

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martina Šimag

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Dr. sc. Darko Kozarac, dipl. ing.

Student
Martina Šimag

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Darku Kozarcu na pomoći i korisnim savjetima prilikom izrade završnog rada. Također se želim zahvaliti dipl. ing. asistentu Mladenu Božić, mag. ing. na ustupljenim materijalima i korisnim informacijama za izradu ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na podršci i razumijevanju iskazanom tijekom studiranja.

Martina Šimag



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Martina Šimag** Mat. br.: 0035196391

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj povrata ispušnih plinova (EGR) na rad Ottovog motora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of exhaust gas recirculation (EGR) on SI engine operation**

Opis zadatka:

Povrat ispušnih plinova (engl. Exhaust Gas Recirculation - EGR) prvenstveno je uvedena kao metoda smanjivanja stvaranja dušikovih oksida u Dieslovim motorima. U posljednjim godinama zbog utjecaja EGR-a na proces izgaranja sve se češće razmatra primjena EGR-a i na Ottove motore kako zbog potencijalno povoljnog utjecaja na smanjenje sklonosti detonantnom izgaranju tako i zbog smanjenja stvaranja dušikovih oksida kod Ottovih motora s direktnim ubrizgavanjem i siromašnom smjesom. Utjecaj EGR-a na rad motora još uvijek nije do kraja istražen i predmet je brojnih analiza. U ovom radu potrebno je istražiti utjecaj EGR-a na izgaranje i rad Ottovog motora. U tu svrhu potrebno je prvo napraviti temeljni pregled dostupne literature o utjecaju EGR-a na rad motora, a zatim nakon toga eksperimentalno ispitati osnovni utjecaj na proces izgaranja (brzinu izgaranja, duljinu izgaranja i potpunost izgaranja) te na elementarne značajke kao što su moment, snaga i potrošnja goriva, u nekoliko radnih točaka motora. U skladu s time u radu je potrebno:

- napraviti pregled literature iz područja utjecaja EGR-a na rad Ottovog motora,
- definirati utjecaj koji se želi eksperimentalno ispitati,
- pripremiti plan eksperimentalnog ispitivanja (plan pokusa),
- provesti mjerenja,
- analizirati dobivene rezultate,
- izvesti zaključke.

Pri izradi se treba pridržavati pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

- 1. rok: 24. veljače 2017.
- 2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
- 3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
- 3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. Općenito o EGR-u.....	3
2.1 Podjela EGR sustava	3
2.2 Konstrukcija EGR sustava	6
2.3 Utjecaj sustava povrata ispušnih plinova	7
2.4 Formacija NO _x spojeva.....	8
2.5 Udio EGR-a.....	9
2.6 Rad sustava povrata ispušnih plinova kod Diesellovog i Ottovog motora.....	10
3. Ispitivanje motora u Laboratoriju za motore i vozila.....	12
3.1 Cilj ispitivanja	12
3.2 Ispitni laboratorij	12
3.3 Motor s unutrašnjim izgaranjem	14
3.4 Mjerna oprema.....	15
3.4.1 Motorna kočnica	15
3.4.2 Mjerenje tlaka	16
3.4.3 Mjerenje temperature	16
3.4.4 Mjerenje protoka zraka i potrošnje goriva	17
3.4.5 Mjerenje sastava ispušnih plinova	18
3.5 Metoda mjerenja.....	19
3.5.1 Faktor pretička zraka.....	22
3.5.2 Tlak u usisu, maseni protoci zraka i goriva	23
4. Rezultati mjerenja i diskusija.....	24
5. Zaključak.....	40
Literatura:.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1 Shematski prikaz sustava EGR-a.....	3
Slika 2 Niskotlačni (lijevo) i visokotlačni (desno) EGR sustav [1].....	5
Slika 3 Čisti (lijevo) i nečisti (desno) niskotlačni EGR sustav [1].	6
Slika 4 Centralizirana i decentralizirana EGR nabava [1].....	6
Slika 5 Ispitna stanica (lijevo) i kontrolna soba (desno).....	13
Slika 6 Shema postava ispitne stanice.	13
Slika 7 HATZ 1D81 motor [12].....	14
Slika 8 Sustav EGR-a u Laboratoriju za motore i vozila.....	15
Slika 9 Generatorska kočnica.....	16
Slika 10 Električni termopar tip K.	17
Slika 11 Anemometar s ugrijanom žicom, Model 2017L-V.....	17
Slika 12 Spremnik goriva na vagi i boca s dušikom.	18
Slika 13 Analizatori ispušnih plinova, Bosch ETT 8.55 EU (lijevo) i GRC, Model MIR2M (desno).....	19
Slika 14 Tlak u cilindru: normalno izgaranje (lijevo), pomalo detonantno (u sredini) i izrazito detonantno izgaranje (desno) [11].	20
Slika 15 Shema određivanja pokazatelja pojave detonacije [9].....	21
Slika 16 Ovisnost srednjeg indiciranog tlaka o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.	24
Slika 17 Ovisnost koeficijenta varijacije srednjeg indiciranog tlaka o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.....	25
Slika 18 Ovisnost najveće amplitude oscilacija tlaka o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.	26
Slika 19 Ovisnost neizgorjelih ugljikovodika o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.....	27
Slika 20 Ovisnost volumnog udjela ugljikovog monoksida o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.	27
Slika 21 Ovisnost količine dušikovih oksida o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.....	28
Slika 22 Ovisnost specifične indicirane potrošnje goriva o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.	29
Slika 23 Ovisnost indicirane korisnosti o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.	30

Slika 24 Ovisnost tlaka u cilindru o kutu koljenastog vratila za isti kut paljenja i različite udjele EGR-a.	31
Slika 25 Ovisnost brzine oslobađanja topline (ROHR) o kutu koljenastog vratila za isti kut paljenja i različite udjele EGR-a.	32
Slika 26 Ovisnost tlaka u cilindru o kutu koljenastog vratila za optimalni kut paljenja.	34
Slika 27 Ovisnost brzine oslobađanja topline (ROHR) o kutu koljenastog vratila za optimalni kut paljenja.	34
Slika 28 Ovisnost srednjeg indiciranog tlaka o udjelu EGR-a.	35
Slika 29 Ovisnost koeficijenta varijacije srednjeg indiciranog tlaka o udjelu EGR-a.	36
Slika 30 Ovisnost neizgorjelih ugljikovodika o udjelu EGR-a.	36
Slika 31 Ovisnost volumnog udjela ugljikovog monoksida o udjelu EGR-a.	37
Slika 32 Ovisnost količine dušikovih oksida o udjelu EGR-a.	37
Slika 33 Ovisnost specifične indicirane potrošnje goriva o udjelu EGR-a.	38
Slika 34 Ovisnost indicirane korisnosti o udjelu EGR-a.	38
Slika 35 Ovisnost temperature ispušnih plinova u ispuhu o udjelu EGR-a.	39

POPIS TABLICA

Tablica 1 Granične vrijednosti štetnih tvari za osobna vozila i kombije (M1) s Ottovim motorom u Europi.....	2
Tablica 2 Specifikacije HATZ 1D81 motora.....	14
Tablica 3 Svojstva INA BS 95 Class	19
Tablica 4 Radni uvjeti rada motora.....	22
Tablica 5 Promjena tlaka u usisu s povećanjem udjela EGR-a	23

NOMENKLATURA

CO	Ugljikov monoksid
CO ₂	Ugljikov dioksid
CO ₂ _{usis}	Udio ugljikovog dioksida u usisu bez primjene EGR sustava
CO ₂ _{ispuh_EGR}	Udio ugljikovog dioksida u ispuhu s primjenom EGR sustava
CO ₂ _{usis_EGR}	Udio ugljikovog dioksida u usisu s primjenom EGR sustava
CoV IMEP	Koeficijent varijacije srednjeg indiciranog tlaka
C _p	Toplinski kapacitet smjese pri konstantnom tlaku
DMT	Donja mrtva točka
EGR	Exhaust Gas Recirculation, Povrat ispušnih plinova
g _i	Specifična indicirana potrošnja goriva
GMT	Gornja mrtva točka
H _d	Donja ogrjevna vrijednost goriva
H _g	Gornja ogrjevna vrijednost goriva
HC	Neizgorjeli ugljikovodici
H ₂ O	Voda, vodena para
IMEP	Indicated Mean Effective Pressure, Srednji indicirani tlak
IMPO	Integral of modulus of pressure oscilation, Integral modula oscilacija tlaka
IOB	Istraživački oktanski broj
KV	Koljenasto vratilo
MAPO	Maximum Amplitude Pressure Oscilation, Najveća amplituda oscilacije tlaka
MOB	Motorni oktanski broj

\dot{m}_{gorivo}	Maseni protok goriva
m_{EGR}	Masa recirkuliranih ispušnih plinova
m_{uk}	Ukupna masa smjese u usisu
\dot{m}_{zrak}	Maseni protok zraka
n	Brzina vrtnje ispitivačkog motora
NO_x	Dušikovi oksidi
NO	Dušikov monoksid
NO_2	Dušikov dioksid
N_2O	Didušikov oksid
NVO	Negative valve overlap, negativno preklapanje ventila
PM	Particulate matter, Krute čestice
PN	Particulate number
p_{usis}	Tlak u usisu
ROHR	Rate of Heat Release, Brzina oslobađanja topline
SI	Spark Ignited, Svjećicom paljena goriva smjesa
Z	Stvarna količina zraka za izgaranje
Z_0	Stehiometrijska količina zraka za izgaranje
η_i	Indicirana korisnost
λ	Faktor pretička zraka

SAŽETAK

Emisije štetnih ispušnih plinova ograničene su strogim zakonskim propisima, zbog čega je zadatak inženjera pronaći načine na koji će smanjiti emisiju štetnih ispušnih plinova. Povrat ispušnih plinova razvio se prvenstveno kod Diesellovih motora kako bi smanjivao emisiju dušikovih oksida ograničavajući temperature u cilindru razrjeđivanjem svježeg zraka u usisu s određenim udjelom EGR-a .

Danas se povrat ispušnih plinova počeo primjenjivati i kod Ottovih motora zajedno s ostalim naprednim tehnologijama za smanjivanje emisija štetnih ispušnih plinova. Povrat ispušnih plinova kod Ottovih motora primarno se koristi kako bi smanjivao gubitke rada izmjene radne tvari pri djelomičnom opterećenju, tako poboljšavajući potrošnju goriva i sekundarno kako bi se smanjila emisija dušikovih oksida. Najveća prednost EGR-a je sposobnost smanjenja sklonosti detonantnom izgaranju.

Svrha ovog rada je istražiti utjecaj EGR-a na izgaranje i rad Ottovog motora. Istraživanje je provedeno na jednocilindarskom četverotaktnom Ottovom motoru pri različitim udjelima EGR-a. Mjerenja su se odvijala pri konstantnoj brzini vrtnje motora i stehiometrijskoj gorivoj smjesi.

Nakon provedene analize rezultata zaključuje se da se povratom ispušnih plinova smanjuje emisija dušikovih oksida s istovremenim povećanjem emisija neizgorjelih ugljikovodika i ugljikovog monoksida u ispušnim plinovima kao posljedica nepotpunosti procesa izgaranja. Također je prikazan utjecaj EGR-a na smanjenje potrošnje goriva i povećanje korisnosti motora te na ostale veličine kao što su tlak u cilindru, brzina oslobađanja topline te temperatura ispušnih plinova.

Ključne riječi: EGR, ispitivanje motora, analiza rezultata.

SUMMARY

The exhaust emissions are limited by stringent regulations that are defined by the state government, which is why the task of engineers is to find ways to reduce exhaust emissions now days. Exhaust Gas Recirculation (EGR) was firstly adopted in diesel engine as one of the effective measures to reduce formation of nitrogen oxides by limiting the combustion chamber temperature thanks to the dilution of the fresh charge with a certain amount of exhaust gases at the engine intake.

Today, EGR is commonly used also in spark-ignited engine together with other advanced techniques. Exhaust Gas Recirculation on spark-ignited engine is employed primarily to reduce throttling loss at part load range, thus reducing the fuel consumption, and secondarily, to reduce the emission of nitrogen oxides. The crucial benefit of application of EGR is that it improves the detonation resistance at full load operation.

The aim of this work is to review the influence of EGR on engine combustion and running on spark-ignited engine. Investigation was carried out on a single-cylinder four-stroke spark-ignited engine at different EGR ratios. Measurements were carried out at constant load speed and with stoichiometric mixture.

From deep analysis, with the EGR the NO_x emission is reduced with the increased rates of unburnt hydrocarbons and carbon monoxide as a result of incomplete combustion. The influence of EGR is also shown on reduced fuel consumption and increased engine efficiency as well as other values such as in-cylinder pressure, rate of heat release, exhaust temperature.

Key words: EGR, engine testing, analysis of the results.

1. UVOD

Motori s unutarnjim izgaranjem su jedan od glavnih pokretača modernog industrijskog društva. Moderno industrijsko društvo ne bi postojalo da nije bilo razvoja automobila, tehnologije, industrije, transporta, itd. Iako su motori s unutarnjim izgaranjem donijeli mnogo koristi ljudskom društvu, također su prouzročili štetne posljedice za okoliš i zdravlje čovjeka. Tu se prvenstveno podrazumijevaju štetne emisije ispušnih plinova koje nastaju izgaranjem goriva u motoru.

Kod ispušnih plinova javljaju se sljedeći glavni spojevi: vodena para (H_2O), ugljikov dioksid (CO_2), ugljikov monoksid (CO), dušikovi oksidi (NO_x), neizgorjeli ugljikovodici (HC-spojevi) i krute čestice (PM), od kojih vodena para ne šteti okolišu. Jedini spoj koji je štetan za okoliš, ali nema neposrednog djelovanja na ljudsko zdravlje je ugljikov dioksid. Ugljikov dioksid je staklenički plin te se smatra glavnim uzročnikom globalnog zatopljenja. Spojevi koji su iznimno otrovni i štetni za ljude i okoliš su ugljikov monoksid, dušikovi oksidi, neizgorjeli ugljikovodici te krute čestice. Ugljikov monoksid je izuzetno otrovan plin bez boje i mirisa te pri udisanju većih koncentracija dolazi do vezanja hemoglobina s ugljikovim monoksidom, te tako onemogućuje prenošenje kisika do tjelesnih tkiva. Ugljikov monoksid nastaje pri nepotpunom izgaranju zbog nedostatka kisika, odnosno pri bogatoj gorivoj smjesi $\lambda < 1$. Nadalje, dušikovi oksidi su skupni naziv za dušikov monoksid NO, dušikov dioksid NO_2 te didušikov oksid N_2O . Izuzetno su štetni za okoliš zbog sudjelovanja u stvaranju kiselih kiša i smoga. Također su jako štetni za ljudsko zdravlje, mogu izazvati probleme u dišnim sustavima te u velikim koncentracijama nadražiti plućno tkivo. Dušikovi oksidi nastaju na visokim temperaturama i tlakovima izgaranja. Isto kao i kod ugljikovog monoksida, neizgorjeli ugljikovodici se pojavljuju kod nepotpunog izgaranja zbog nedostatka kisika. Također, javljaju se i kod jako siromašne smjese goriva, odnosno $\lambda > 1$. Nadražuju sluznicu te su uzrok neugodnog mirisa ispušnih plinova. Krute čestice, koje se najvećim dijelom sastoje od čađe, su štetne za ljude i okoliš. Konstantno udisanje čestica može prouzročiti rak pluća.

U zemljama diljem svijeta zakonom su propisane maksimalno dozvoljene emisije štetnih ispušnih plinova za motore s unutarnjim izgaranjem. U ispušnim plinovima motora s unutarnjim izgaranjem ograničene su emisije ugljikovog monoksida, neizgorjelih ugljikovodika, dušikovih oksida i krutih čestica. Tablicom 1 prikazane su granične vrijednosti štetnih tvari za osobna vozila i kombije s Ottovim motorom u Europi.

Tablica 1 Granične vrijednosti štetnih tvari za osobna vozila i kombije (M1) s Ottovim motorom u Europi

M1	CO	HC	NO_x	PM	PN
≤ 2, 5 t, ≤ 6 sjedala	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[l/km]
Euro III od 2000.	2,30	0,2	0,15	-	-
Euro IV od 2005.	1,00	0,10	0,08	-	-
Euro V od 2009.	1,00	0,10	0,06	0,005*	-
Euro VI od 2014.	1,00	0,10	0,06	0,005*	$6 \cdot 10^{11}$
* za izravno ubrizgavanje 0,0045					

Kao što se može primijetiti iz Tablice 1.1, granica dozvoljene količine dušikovih oksida svakom daljnjom normom postaje niža. Stoga je smanjenje štetnih emisija ispušnih plinova postao jedan od najvećih izazova inženjera.

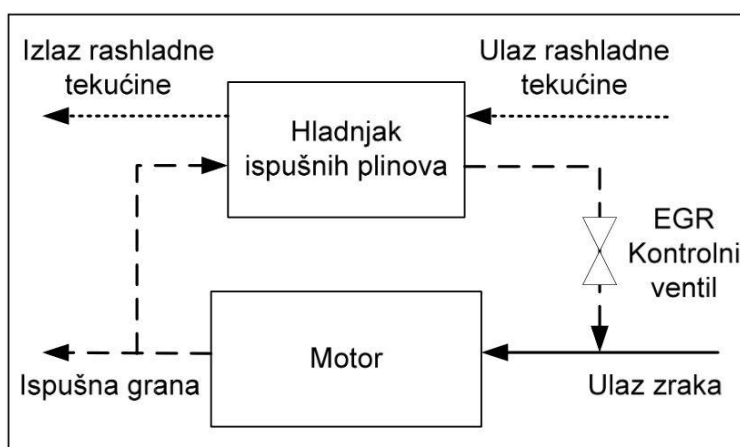
Kao iznimno obećavajuća i efikasna metoda za smanjenje dušikovih oksida u ispušnim plinovima kod Ottovih i Dieselovih motora pokazao se *sustav povrata ispušnih plinova* ili *EGR* (*engl. Exhaust Gas Recirculation*) sustav. Premda nije nova tehnologija, EGR sustav postao je neizostavan dio vozila zajedno sa ostalim tehnologijama za smanjivanje emisije štetnih ispušnih plinova.

Cilj ovog rada je ispitati i predstaviti utjecaj EGR-a na proces izgaranja i rad Ottovog motora u pogledu potrošnje goriva, emisija štetnih ispušnih plinova i performansi vozila.

2. Općenito o EGR-u

Kod EGR sustava dio se ispušnih plinova (nadalje u tekstu: povratni ispušni plinovi ili EGR) iz ispušne grane preusmjerava putem reguliranog EGR ventila kroz EGR hladnjak ponovno u usis. Najbitnije komponente EGR sustava su cijev za vođenje povratnih ispušnih plinova do usisne cijevi, ventil koji regulira udio prolaska povratnih ispušnih plinova te hladnjak koji regulira temperaturu EGR-a.

Shematski prikaz sustava EGR-a prikazan je Slikom 1.



Slika 1 Shematski prikaz sustava EGR-a.

2.1 Podjela EGR sustava

EGR sustav može se podijeliti prema načinu vraćanja povratnih ispušnih plinova u cilindar, na *vanjski EGR sustav* (engl. *External EGR System*) i na *unutarnji EGR sustav* (engl. *Internal EGR System*).

Vanjski EGR sustav postiže se preusmjeravanjem ispušnih plinova iz ispušne grane u usis, gdje se miješa sa svježim punjenjem. Unutarnji EGR sustav može se postići dvjema metodama: *dodatnim otvaranjem ispušnih ventila za vrijeme takta usisa* i *negativnim preklapanjem ventila* (engl. *negative valve overlap NVO*). Kod prve metode, za vrijeme takta usisa ispušni ventil se dodatno otvori te se produkti izgaranja uvlače u cilindar zbog gibanja klipa od GMT prema DMT. Kod druge metode, negativno preklapanje ventila postiže se ranijim zatvaranjem ispušnih ventila gdje dio ispušnih plinova ostaje zarobljen u cilindru te se oni uslijed gibanja klipa od

DMT prema GMT u taktu ispuha dodatno komprimiraju. Miješanjem produkta izgaranja sa svježim punjenjem dobiva se razrijeđena goriva smjesa. Konstrukcija unutarnjeg EGR sustava zahtjeva poboljšanu izvedbu razvodnih elementa razvodnog mehanizma koji može brzo i efikasno mijenjati razvodni dijagram tako postižući varijabilni rad ventila. Varijabilni rad ventila omogućuje različite udjele EGR-a u cilindru. Unutarnji EGR sustav pokazao se kao jeftinija varijanta za vraćanje ispušnih plinova u cilindar budući da ne iziskuje cjevovode i ventile, međutim vanjskim EGR-om recirkulirani ispušni plinovi mogu se hladiti u EGR hladnjaku.

Također, EGR sustav moguće je podijeliti u dodatne dvije skupine prema tome da li se produkti izgaranja hlade ili ne, na *nehlađeni EGR sustav (engl. hot EGR)* i na *hlađeni EGR sustav (engl. cooled EGR)*.

Kod nehlađenog EGR sustava se udio ispušnih plinova, odnosno produkti izgaranja, direktno vraćaju u usis bez prethodnog hlađenja, dok se kod hlađenog EGR sustava produkti izgaranja hlade prije ulaska u usis. Vrući produkti izgaranja bolje zagrijavaju usis što omogućuje bolji i potpuniji proces izgaranja te veću toplinsku iskoristivost kod nehlađenog EGR sustava, dok se kod hlađenog EGR sustava povećava gustoća radne tvari u usisu, a samim time i volumenska iskoristivost motora. Kod hlađenog EGR sustava može se postići manja emisija NO_x spojeva zbog smanjene temperature u cilindru u odnosu na nehlađeni EGR sustav, ali je kod nehlađenog EGR sustava manja HC emisija zbog boljeg i potpunijeg izgaranja. Hlađeni EGR sustav ima kompliciranu strukturu i višu cijenu postrojenja u odnosu na nehlađeni EGR sustav.

Potrebno je spomenuti još podjelu prema tome uzimaju li se ispušni plinovi prije ili poslije turbopunjača, na *niskotlačni EGR sustav (engl. Low pressure EGR)* i *visokotlačni EGR sustav (engl. High pressure EGR)*.

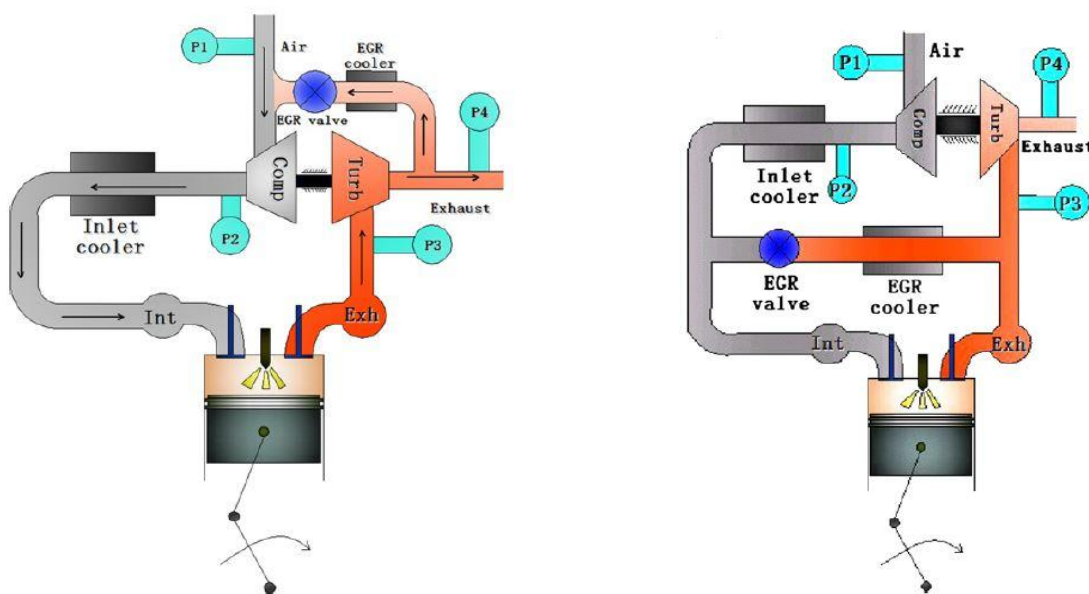
Kod niskotlačnog EGR sustava ispušni plinovi prvo prolaze kroz turbinu, potom se dio ispušnih plinova odvaja te prolazi kroz kompresor zajedno sa svježim zrakom. Razlika tlaka između tlaka na izlasku iz turbine i ulasku u kompresor je mala pa je potrebno osigurati visoku propusnost EGR ventila i EGR hladnjaka kako bi se osigurao dostatan protok produkta izgaranja. Nadalje, EGR hladnjak mora imati visoku učinkovitost (iskoristivost) kako bi se osigurala iskoristivost kompresora odnosno kako ne bi došlo do pregrijavanja usisa, a time do smanjenja volumenske

iskoristivosti. Niskotlačni EGR sustav se nadalje može podijeliti na tkzv. *čisti* (engl. *clean LP EGR*) i *nečisti* EGR sustav (engl. *dirty LP EGR*).

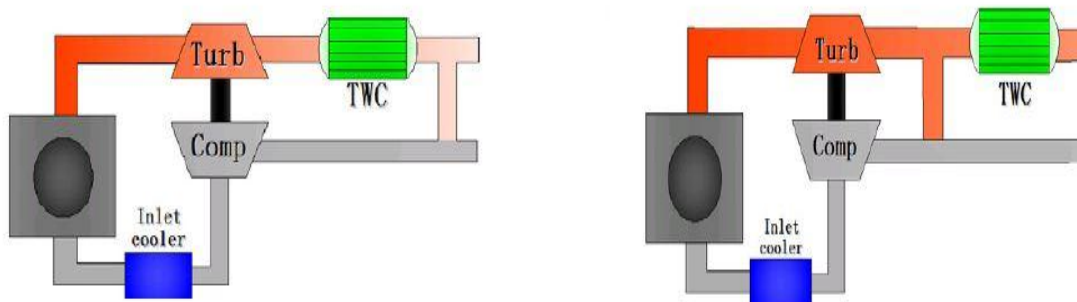
Kod primjene čistog EGR sustava, ispušni plinove prolaze kroz trokomponentni katalizator, dok se kod nečistog EGR sustava ispušni plinovi ne pročišćavaju. Nedostatak primjene čistog EGR sustava je moguća korozija kompresorskih lopatica uslijed abrazivnog djelovanja keramičkih čestica iz trokomponentnog katalizatora zbog čega se kompresorske lopatice premazuju posebnim slojem.

Kod visokotlačnog EGR sustava, povratni ispušni plinovi uzimaju se ispred turbine i miješaju se s pretkomprimiranim zrakom nakon kompresora. Potrebno je osigurati visoku razliku tlaka između tlaka u ispuhu i tlaka u usisu. U protivnom, udio ispušnih plinova ne bi mogao prirodno teći u usis, što se najčešće javlja kod niskih brzina vrtnje motora i visokog opterećenja motora.

Slikom 2 prikazane su sheme niskotlačnog i visokotlačnog EGR sustava, a slikom 3 podjela niskotlačnog EGR sustava na čisti i nečisti niskotlačni EGR sustav.



Slika 2 Niskotlačni (lijevo) i visokotlačni (desno) EGR sustav [1].



Slika 3 Čisti (lijevo) i nečisti (desno) niskotlačni EGR sustav [1].

2.2 Konstrukcija EGR sustava

Parametri koji su važni za konstrukciju EGR sustava, neovisno da li se radi o Ottovom ili Dieslovom motoru, su dobra homogena raspodjela EGR-a svakom cilindru te dobar dinamički odaziv. Recirkulirani ispušni plinovi mogu se dovoditi cilindrima centralizirano ili decentralizirano.

	EGR dobava	Broj EGR ventila
	centralizirano	1
	decentralizirano	1 po cilindru
	decentralizirano	1 višestruki ventil

Slika 4 Centralizirana i decentralizirana EGR nabava [1].

Konstrukcija centraliziranog EGR sustava je izrađena tako da se dobava povratnih ispušnih plinova odvija daleko od usisnih ventila, najčešće na ulazu u usisnoj cijevi. Ovakva konstrukcija omogućuje dobro miješanje EGR-a i svježeg zraka i dobru raspodjelu svakom cilindru.

S druge strane, kod decentraliziranog EGR sustava je dobava povratnih ispušnih plinova neposredno ispred usisnih ventila. Kao što se može vidjeti na slici 4 moguće su dvije izvedbe decentraliziranog EGR sustava. Prva izvedba sadrži jedan ventil po svakom cilindru, a druga izvedba višestruki ventil. Kod obje izvedbe se postiže optimalna raspodjela EGR-a svakom cilindru te dobar dinamički odaziv.

2.3 Utjecaj sustava povrata ispušnih plinova

Primjenom sustava povrata ispušnih plinova mogu se uočiti tri utjecaja, a to su redom toplinski i kemijski utjecaj te utjecaj razrjeđivanja.

Toplinski utjecaj očituje se povećanjem specifičnog toplinskog kapaciteta smjese zbog miješanja povratnih ispušnih plinova sa svježim zrakom. Do povećanja specifičnog toplinskog kapaciteta smjese dolazi zbog toga što ugljikov dioksid i vodena para iz ispušnih plinova imaju veći specifični toplinski kapacitet od kisika i dušika iz zraka. Toplinski kapacitet, C (J/K), definira se kao količina topline koju nekom tijelu treba dovesti da mu se temperatura povisi za 1 K, odnosno to znači da pri konstantnoj toplini, goriva smjesa s većim toplinskim kapacitetom će dati niže temperature izgaranja u cilindru. Stoga, kao posljedica povećanja specifičnog toplinskog kapaciteta smjese uslijed primjene EGR-a smanjuju se vršne temperature izgaranja u cilindru, što direktno utječe na formaciju NO_x spojeva.

Kemijski utjecaj očituje se disocijacijom ugljikovog dioksida CO_2 iz ispušnih plinova tijekom izgaranja, odnosno raspadanje stabilnog CO_2 u nestabilni CO na što se troši toplina izgaranja, a to u konačnici dovodi do smanjenja temperature izgaranja.

Utjecaj razrjeđivanja kod Dieselovih motora odnosi se na smanjenje koncentracije kisika u gorivoj smjesi prilikom uvođenja udjela povratnih ispušnih plinova, što dovodi do smanjenja brzine kemijske reakcije između goriva i kisika, a to u konačnici dovodi do smanjenja brzine izgaranja. Ottovi motori rade sa stehiometrijskom gorivom smjesom kako bi trokomponentni katalizator mogao smanjivati emisiju štetnih ispušnih plinova. Budući da rade sa stehiometrijskom gorivom smjesom, uvođenjem povratnih ispušnih plinova ne dolazi do smanjenja količine kisika potrebnog za izgaranje, već do razrjeđenja energije gorive smjese. S druge strane, udio povratnih ispušnih plinova utječe na brzinu širenja plamena. Molekule

produkta izgaranja smetaju molekulama kisika i goriva u uspostavljanju kontakta što usporava proces izgaranja. Dakle, utjecaj razrjeđenja kod Ottovih motora očituje se smanjenjem količine energije izgaranja po kilogramu gorive smjese kao i smanjenjem brzine širenja plamena.

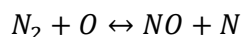
Općenito, primjenom sustava povrata ispušnih plinova zbog smanjene brzine kemijske reakcije između goriva i kisika dolazi do produženja procesa izgaranja u cilindru.

2.4 Formacija NO_x spojeva

NO_x spojevi nastaju pri uvjetima visoke temperature i visoke koncentracije kisika u komori za izgaranje. Kod motora s unutarnjim izgaranjem, NO_x spojevi se pretežno sastoje od dušikovih monoksida NO koji brzo oksidiraju uz prisutnost zraka u okolini u dušikov dioksid NO_2 .

Dušikov monoksid formira se u visokotemperaturnim područjima unutar komore za izgaranje. Formacija NO_x spojeva je kompliciran proces te se u potpunosti razlikuje od formacije HC i CO spojeva koji su rezultat nepotpunog izgaranja. Dušik se rijetko nalazi u gorivu te je inertan pri normalnim temperaturama. Osnova formacije NO_x spojeva je termička reakcija između kisika i dušika u okolini visokih temperatura.

Formacija NO_x spojeva može se opisati mehanizmom po Zeldovich-u:



Formacija NO_x spojeva može se opisati eksponencijalnom funkcijom. Brzina formacije NO_x spojeva može se opisati jednadžbom 2 iz koje proizlazi da se smanjenje emisije NO_x spojeva postiže smanjenjem temperature i koncentracije kisika u komori za izgaranje.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = \left(\frac{6 \cdot 10^{16}}{T^{0,5}} \right) \exp\left(\frac{-69,096}{T} \right) [\text{O}_2]_e^{0,5} [\text{N}_2]_e. \quad (2)$$

2.5 Udio EGR-a

EGR(%) predstavlja udio produkta izgaranja u ukupnoj smjesi u usisu:

$$EGR(\%) = \frac{m_{EGR}}{m_{uk}}. \quad (3)$$

Približan izraz za računanje udjela EGR-a dan je jednadžbom 4. Jednadžba 4 predstavlja omjer ugljikovog dioksida u usisu i ispuhu. Ovaj izraz koristio se pri ispitivanju za računanje približnog udjela EGR-a.

$$EGR(\%) = \frac{CO_{2usis_EGR} - CO_{2usis}}{CO_{2ispuh_EGR}} \quad (4)$$

gdje je:

CO_{2usis_EGR} - udio ugljikovog dioksida u usisu s primjenom EGR sustava,

CO_{2usis} - udio ugljikovog dioksida u usisu bez primjene EGR sustava,

CO_{2ispuh_EGR} - udio ugljikovog dioksida u ispuhu s primjenom EGR sustava.

Dodavanjem udjela EGR-a rastu cikličke varijacije tlaka, odnosno raste koeficijent varijacije srednjeg indiciranog tlaka. Poželjno je da koeficijent varijacije srednjeg indiciranog tlaka bude manji od 10% gledano s aspekta sigurnosti i udobnosti vožnje. Također, dodavanjem udjela EGR-a pada termički stupanj djelovanja motora te se povećava emisija neizgorjelih ugljikovodika i ugljikovog monoksida. Stoga se mora postaviti granica najvećeg udjela EGR-a, a upravo ove navedene veličine predstavljaju tu granicu. Kako povratni ispušni plinovi nepovoljno djeluju na izgaranje i potrošnju goriva, najveći udio EGR-a može iznositi do 20% kod Ottovih, odnosno 60% kod Dieselovih motora. Razlog prethodno spomenute razlike je to što Dieselovi motori rade sa siromašnom smjesom, a Ottovi sa stehiometrijskom gorivom smjesom.

Prevelika količina EGR-a u usisu dovodi do premalih brzina izgaranja te je uzrok nemirnom radu motora. Pod tim se podrazumijeva nestabilno izgaranje, velike cikličke varijacije tlaka, velike količine štetnih emisija te nemogućnost normalne vožnje.

2.6 Rad sustava povrata ispušnih plinova kod Diesellovog i Ottovog motora

Dieselovi motori proizvode manje količine emisije štetnih ispušnih plinova u odnosu na Ottove motore, ali imaju povećanu emisiju dušikovih oksida i krutih čestica (čada). Stoga se EGR sustav prvotno razvio kako bi smanjivao štetnu emisiju dušikovih oksida kod Diesellovih motora. EGR sustav djeluje tako da recirkulirani ispušni plinovi zamijene svježi zrak. Kao posljedica takve zamjene, manja je količina kisika u usisnoj smjesi raspoloživa za izgaranje. Smanjena raspoloživa količina zraka smanjuje i faktor pretička zraka, odnosno smjesa postaje bogatija. S druge strane, miješanjem svježeg zraka povratnim ispušnim plinovima povećava se specifični toplinski kapacitet smjese, što znači smanjenje temperature plamena u cilindru tijekom izgaranja. Stoga, kombinacija smanjene raspoložive količine zraka za izgaranje i smanjena temperatura plamena u cilindru rezultira smanjenjem emisije štetnih dušikovih oksida kod Diesellovih motora. Nedostatak EGR sustava kod Diesellovih motora je povećanje emisije krutih čestica, odnosno čade koja se javlja kao posljedica smanjenja koncentracije kisika u cilindru.

S druge strane, kod Ottovih motora postoje veliki gubitci pri djelomičnom opterećenju koji smanjuju termičku iskoristivost motora te povećavaju emisiju štetnih ispušnih plinova, ponajviše ugljikovog dioksida. Kako bi se smanjili gubitci rada izmjene radne tvari i topline kod Ottovih motora, počeo se primjenjivati EGR sustav. Posljedično bi se smanjila potrošnja goriva, a povećala termička iskoristivost motora pri djelomičnom opterećenju. Također, EGR sustav kod Ottovih motora poboljšava otpornost na detonaciju pri punom opterećenju. Međutim, zbog sve većih i rastućih problema o energiji i okolišu, pribjeglo se prema *'engine downsizing'* metodi. *'Engine downsizing'* označava manji motor u vozilu s performansama koje se dobivaju kod većih motora. Ovo se kod Ottovih motora postiže pomoću različitih tehnologija, npr. prednabijanjem motora turbopunjačem. Međutim, kao posljedica se javljaju povećane temperature izgaranja, što uzrokuje veće emisije dušikovih oksida te se pojavljuje veća sklonost detonantnom radu motora. Detonantni rad motora može prouzročiti velika oštećenja u motoru. Stoga se zbog propisanih dopuštenih emisija štetnih ispušnih plinova, EGR sustav sve više koristi i kod Ottovih motora kako bi se smanjila emisija štetnih dušikovih oksida, kao i pojava detonacije.

Ottov motor radi sa stehiometrijskom gorivom smjesom kako bi trokomponentni katalizator mogao funkcionirati te smanjivati emisije štetnih dušikovih oksida, neizgorjelih ugljikovodika te ugljikovog monoksida. Kod Ottovog motora, povratom ispušnih plinova cilindri se slabije pune svježom smjesom. Recirkulirani ispušni plinovi ne sudjeluju u procesu izgaranja pri čemu dolazi do opadanja temperature izgaranja, a posljedično se smanjuje i udio dušikovih oksida. Kod nenabijenih Ottovih motora primjenom EGR sustava može doći do pada snage motora jer recirkulirani ispušni plinovi zamjenjuju zrak, dok kod prednabijenih Ottovih motora ne dolazi do smanjenja količine zraka za izgaranje te pada snage, već se može smanjiti potrošnja goriva.

3. Ispitivanje motora u Laboratoriju za motore i vozila

3.1 Cilj ispitivanja

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za motore i vozila na Fakultetu Strojarstva i Brodogradnje u Zagrebu. Cilj ispitivanja je proučiti utjecaj sustava povrata ispušnih plinova na izgaranje i rad Ottovog motora. Proučava se utjecaj različitih udjela EGR-a na temperaturu i tlak u cilindru, temperaturu u ispuhu, koeficijent varijacije srednjeg indiciranog tlaka, emisiju štetnih ispušnih plinova, specifičnu indiciranu potrošnju goriva i indiciranu korisnost.

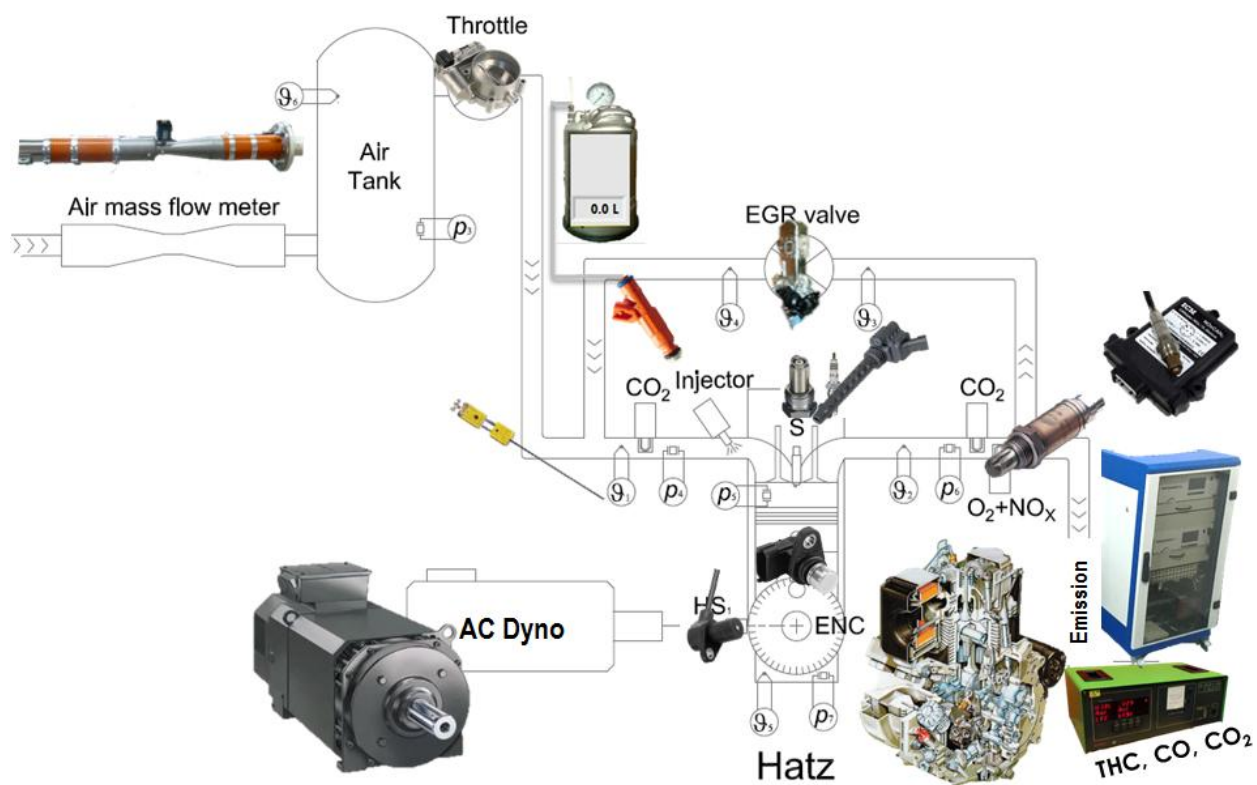
3.2 Ispitni laboratorij

Ispitni laboratorij sastoji se od većeg broja prostorija koje su opremljene različitom opremom potrebnom za provođenje ispitivanja. Ispitna stanica u kojoj su provedena mjerenja Ottovog motora, izvedena je sa sustavom za odvod ispušnih plinova, kao i sa sustavom za dovod svježeg zraka za izgaranje. Ispitna stanica je dobro ventilirana kako bi se ostvarila željena ispitna atmosfera. Također je elastično uležištena radi sigurnosti od širenja vibracija na okolne prostorije. Ispitna stanica zvučno je izolirana kako bi se osigurala zaštita od prekomjerne buke za osobe koje upravljaju motorom. Ispitna stanica odvojena je od kontrolne sobe sigurnosnim staklom kako bi ispitivač mogao nadzirati rad motora te svrsishodno reagirati na njegovo ponašanje. Ispitivač pomoću računala ima uvid u trenutni moment i brzinu vrtnje motora, temperaturu rashladne tekućine, tlak ulja, temperaturu ispuha i ostale veličine. Radi sigurnosti, kontrolna soba ima sigurnosni prekidač koji može trenutno zaustaviti rad motora.

Na slici 5 prikazane su ispitna stanica i kontrolna soba, a na slici 6 je prikazana shema postava ispitne stanice.



Slika 5 Ispitna stanica (lijevo) i kontrolna soba (desno).



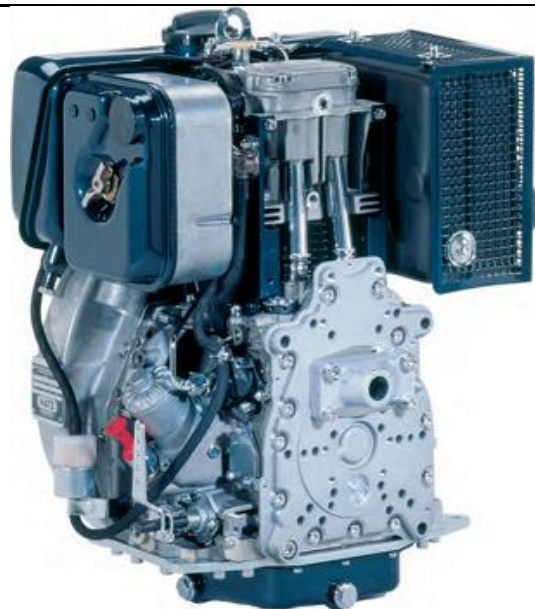
Slika 6 Shema postava ispitne stanice.

3.3 Motor s unutrašnjim izgaranjem

Motor s unutrašnjim izgaranjem koji se koristio u ovom ispitivanju bio je HATZ 1D81, zrakom hlađeni jednocilindarski četverotaktni motor. Izvorni motor je bio Dieslov motor, ali je prenamijenjen da radi kao Ottov motor. Glavne specifikacije motora prikazane su u Tablici 2., a HATZ 1D81 motor na slici 7.

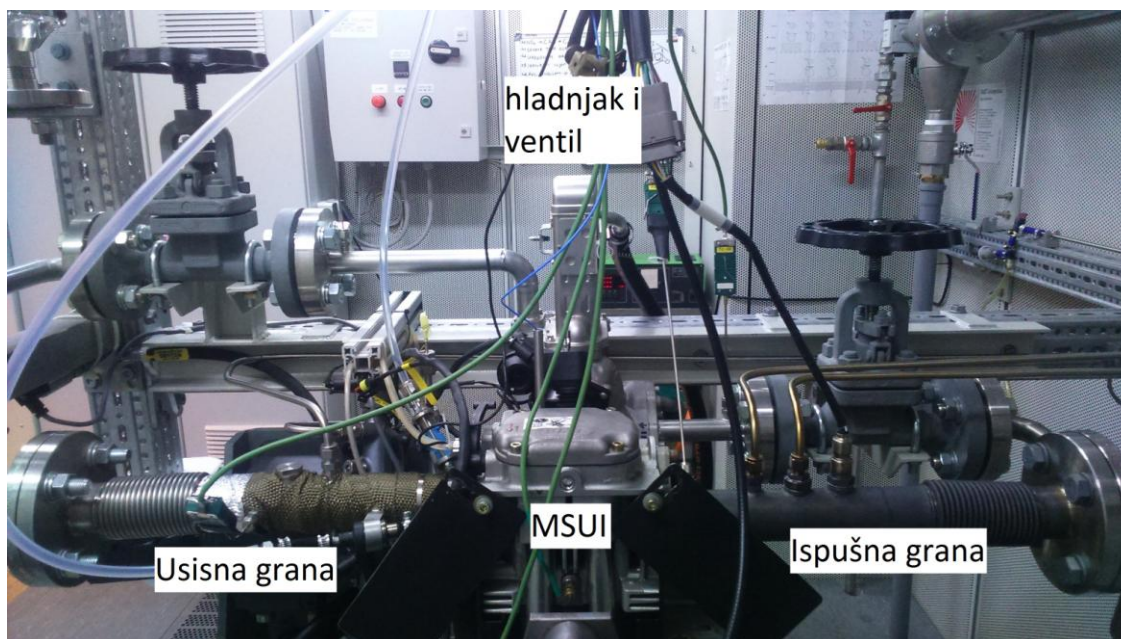
Tablica 2 Specifikacije HATZ 1D81 motora

Tip motora	HATZ 1D81
Broj cilindra	1
Broj taktova	4
Broj ventila	2
Promjer cilindra	100 mm
Hod klipa	85 mm
Volumen cilindra	667 cm ³
Kompresijski omjer	12:1
Način ubrizgavanja goriva	Direktno u usis



Slika 7 HATZ 1D81 motor [12].

Na motoru je ugrađen EGR sustav s njegovim komponentama: ventil kojim se određuje količina EGR-a, hladnjak koji omogućuje regulaciju temperature EGR-a te cjevovodi. Hlađenje EGR-a izvedeno je hlađenjem vodom u izmjenjivaču topline.



Slika 8 Sustav EGR-a u Laboratoriju za motore i vozila.

3.4 Mjerna oprema

3.4.1 Motorna kočnica

Motorna kočnica je mjerni uređaj koji simulira opterećenje motora, kojom se motor koči i kontrolira se brzina vrtnje motora. Nakon što se motor optereti vrši se mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje motora iz čega se zatim u računalu izračuna snaga motora. Na slici 9 prikazana je generatorska kočnica izmjenične struje.



Slika 9 Generatorska kočnica.

3.4.2 Mjerenje tlaka

Tlak u cilindru mjeri se kako bi se pokazao tok tlaka u cilindru kroz cijeli radni ciklus. Iz tlaka u cilindru moguće je izračunati indiciranu snagu. Tlak u cilindru je bitan zbog toga jer se mogu vidjeti cikličke oscilacije tlaka, maksimalni tlakovi u cilindru, utjecaj točke paljenja na porast tlaka, itd. Tlak u cilindru mjeri se pomoću peizo-električnog osjetnika koji je smješten u glavu cilindra.

3.4.3 Mjerenje temperature

Temperature ulja motora, rashladne tekućine, usisne smjese, ispušnih plinova te glave klipa motora mjerene su električnim termoparovima tipa K. Termoparovi se sastoje od dva različita metala koji su na jednom kraju spojeni, a drugi krajevi su im slobodni. Princip rada zasniva se na termoelektričnom efektu. Termoelektrični efekt je pojava napona pri izlaganju metala temperaturnom gradijentu. Kada se dva metala izlože temperaturnom gradijentu, dolazi do razlike potencijala. Zbog razlike potencijala između njih može se mjeriti napon. Promjenom

temperature dolazi do promjene potencijala pa se promjenom napona može odrediti temperatura. Međutim, da bi se postigla promjena temperature, potrebno je temperaturu slobodnog kraja jednog materijala održavati konstantnom (referentna temperatura). Mjerenje temperature važno je jer izravno utječe na formaciju dušikovih oksida, neizgorjelih ugljikovodika te ugljikovih monoksida.



Slika 10 Električni termopar tip K.

3.4.4 Mjerenje protoka zraka i potrošnje goriva

Protok zraka mjeri se anemometrom s ugrijanom žicom, model 2017L-V. Princip rada anemometra s ugrijanom žicom temelji se na promjeni otpora ugrijane žice zbog promjene odvođenja topline u ovisnosti o brzini zraka.

Na slici 11 prikazan je anemometar s ugrijanom žicom.



Slika 11 Anemometar s ugrijanom žicom, Model 2017L-V.

Potrošnja goriva određuje se pomoću gravimetrijskog mjerila, odnosno mjerila koji se sastoji od hermetički zatvorene posude s gorivom, vage i boce s dušikom. Pritom se mjeri vrijeme od trenutka početka mjerenja mase goriva do trenutka potrošnje određene mase goriva. Iz mase

potrošenog goriva i vremena za potrošnju mase tog goriva izračunava se masena potrošnja goriva u jedinici vremena. Boca dušika povezana je s posudom s gorivom te stvara pretlak u posudi s gorivom. Na taj način osiguran je tlak ubrizgavanja goriva. Slikom 12 prikazano je gravimetrijsko mjerilo.



Slika 12 Spremnik goriva na vagi i boca s dušikom.

3.4.5 Mjerenje sastava ispušnih plinova

Na ispušnoj grani instaliran je prikupljač za uzorke ispušnih plinova. Uzorci ispušnih plinova šalju se analizatoru ispušnih plinova na mjerenje emisija ispušnih plinova. Od ispušnih plinova analiziraju se mjere koncentracije ugljikovih dioksida i monoksida u volumnim udjelima te dušikovih oksida i neizgorjelih ugljikovodika u ppm.

Bosch-ovim analizatorom ispušnih plinova mjerio se udio ugljikovog dioksida u ispuhu, a GRF-ovim analizatorom (Model MIR2M) mjeren je udio ugljikovog dioksida na usisu. Pomoću ta dva podatka dobiva se približan udio EGR-a.



Slika 13 Analizatori ispušnih plinova, Bosch ETT 8.55 EU (lijevo) i GRC, Model MIR2M (desno).

3.5 Metoda mjerenja

Sva ispitivanja provedena su nakon određenog vremena rada motora s unutrašnjim izgaranjem do postizanja stabilnog stanja. Najčešće se to uočava kada temperatura glave cilindra postigne temperaturu od 120 °C, a temperatura ulja približno 80 °C.

Kao gorivo koristio se bezolovni i bezsumporni motorni benzin INA BS 95 Class. Svojstva toga goriva prikazana su Tablicom 3.

Tablica 3 Svojstva INA BS 95 Class

Istraživački oktanski broj, IOB	95
Motorni oktanski broj, MOB	85
Gornja ogrjevna vrijednost, H_g	44 MJ/kg
Donja ogrjevna vrijednost, H_d	42,5 MJ/kg

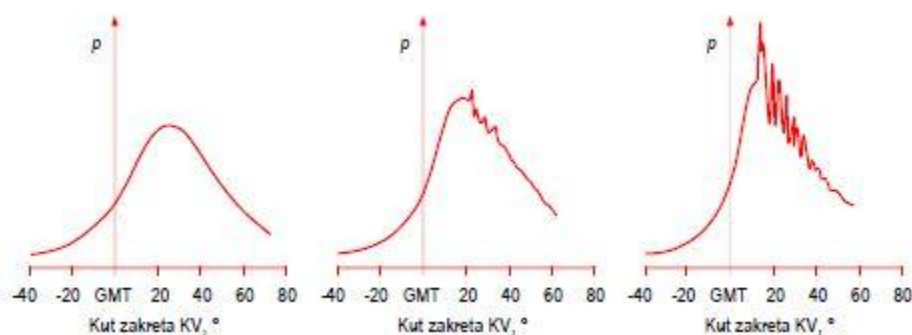
Približan udio EGR-a odredio se jednadžbom 4. Pritom je bilo potrebno mjeriti udjele ugljikovog dioksida u usisu i ispuhu sa i bez primjene EGR-a pomoću analizatora ispušnih plinova.

Ispitivanja su provedena pri konstantnoj brzini vrtnje od 1600 min^{-1} te su podijeljena u 4 ispitne serije. Motor se ispitivao:

- bez udjela EGR-a (referentno stanje)
- sa 11% udjela EGR-a
- sa 15% udjela EGR-a
- sa 20% udjela EGR-a

Ispitivanja su provedena mijenjanjem kuta paljenja gorive smjese, odnosno kut paljenja pomicao se prema nazad sve do pojave detonacije pri konstantnom udjelu EGR-a. Kut paljenja smjese određivao se preko računala pomoću programskog paketa LabVIEW.

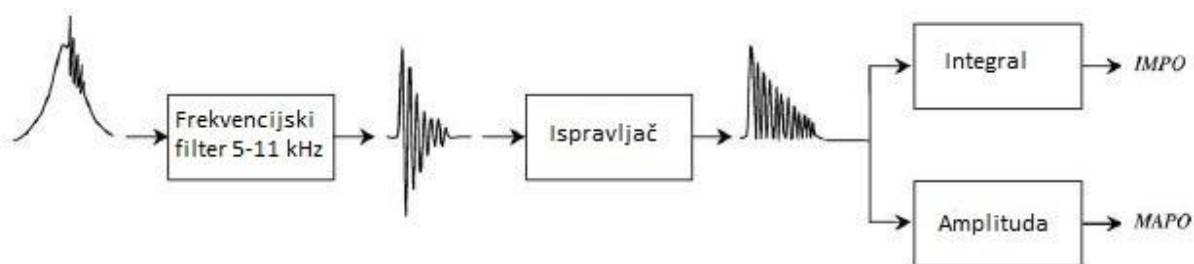
Mjerenje tlaka u cilindru važno je za direktno i pouzdano analiziranje pojave detonacije. Prilikom detonacije dolazi do oscilacija tlaka u cilindru te nestabilnog izgaranja. Na slici 14 prikazana je promjena tlaka u cilindru za normalno izgaranje te za pomalo detonantno i izrazito detonantno izgaranje.



Slika 14 Tlak u cilindru: normalno izgaranje (lijevo), pomalo detonantno (u sredini) i izrazito detonantno izgaranje (desno) [11].

Profil tlaka u cilindru prolazi kroz frekvencijski filter (*engl. Band-pass filter*) koji izdvaja frekvencijski spektar oscilacije tlaka u cilindru. Potom se preko ispravljača dobivaju najveća

amplituda oscilacije tlaka (engl. Maximum Amplitude of Pressure Oscillation, MAPO) i integral modula tlaka oscilacije (engl. Integral of modulus of pressure oscillation, IMPO). Dobivene fizikalne veličine prema [9], MAPO i IMPO, primjenjuju se kao pokazatelji pojave detonacije. Prva veličina, odnosno MAPO, se odnosi na najveće oscilacije tlaka u cilindru, a druga veličina IMPO predstavlja energiju sadržanu u visokofrekventnim oscilacijama tlaka u cilindru. Na slici 15 prikazana je shema određivanja pokazatelja pojave detonacije, MAPO i IMPO.



Slika 15 Shema određivanja pokazatelja pojave detonacije [9].

Pri analizi rezultata potrebno je definirati dopuštenu najveću amplitudu oscilacije tlaka. Ona u našem slučaju iznosi $MAPO=0.3$ bar. Ta vrijednost odredila se kao zadnja vrijednost MAPO-a prije naglog rasta krivulje najveće amplitude tlaka oscilacije u ovisnosti o kutu paljenja. Ova krivulja prikazana je u odjeljku 4. Rezultati mjerenja i diskusija na slici 18.

Tlak u cilindru mjereno je svakih $0,5^\circ$ kuta koljenastog vratila za vrijeme taktova usisa i ispuha, dok su se za vrijeme glavnog procesa izgaranja, odnosno kod najvećeg porasta tlaka, tlak u cilindru mjerio svakih $0,1^\circ$ kuta koljenastog vratila. Za svaku radnu točku snimljena je promjena tlaka za 300 uzastopnih ciklusa, nakon čega se izračunavaju srednje vrijednosti, standardne devijacije te koeficijenti varijacije srednjeg indiciranog tlaka.

Za sve serije mjerenja, temperatura zraka u usisu je bila održana na 15 ± 2 °C.

U tablici 4 prikazani su radni uvjeti rada motora.

Tablica 4 Radni uvjeti rada motora

Radni uvjeti rada motora	
Brzina vrtnje motora, n	1600 min ⁻¹
Maseni protok zraka, \dot{m}_{zrak}	20,27 kg/h
Maseni protok goriva, \dot{m}_{gorivo}	1,3 kg/h
Faktor pretička zraka, λ	1
Gorivo	INA BS 95 Class
Tlak ubrizgavanja goriva	3 bar

Mjerni parametri koji su bitni za provođenje ispitivanja objašnjeni su zasebno u sljedećim odlomcima.

3.5.1 Faktor pretička zraka

Bogatstvo smjese definira se omjerom goriva i zraka te se prikazuje pomoću faktora pretička zraka. Faktor pretička zraka predstavlja omjer stvarne količine zraka za izgaranja Z (kg_{Zr}/kg_G) i stehiometrijske količine zraka za izgaranje Z_0 :

$$\lambda = \frac{Z}{Z_0}.$$

Stehiometrijska količina zraka za izgaranje je ona količina zraka s kojom bi 1 kg goriva u idealnim uvjetima potpuno izgorio, ali tako da u produktima izgaranja ne ostane slobodnog kisika. Stvarna količina zraka za izgaranje je ona količina zraka za izgaranje 1 kg goriva koja se u stvarnim uvjetima nalazi u cilindru motora.

Pomoću faktora pretička zraka mogu se definirati tri područja rada motora. Područje rada motora s bogatom smjesom goriva javlja se kada je faktor pretička zraka manji od 1, odnosno kada postoji višak goriva te manjak zraka. Siromašna smjesa goriva javlja se kada je faktor pretička zraka veći od 1, odnosno u gorivoj smjesi je manjak goriva, a višak zraka.

Ispitivanja su provedena pri stehiometrijskoj gorivoj smjesi, odnosno faktor pretička zraka λ je jednak jedinici.

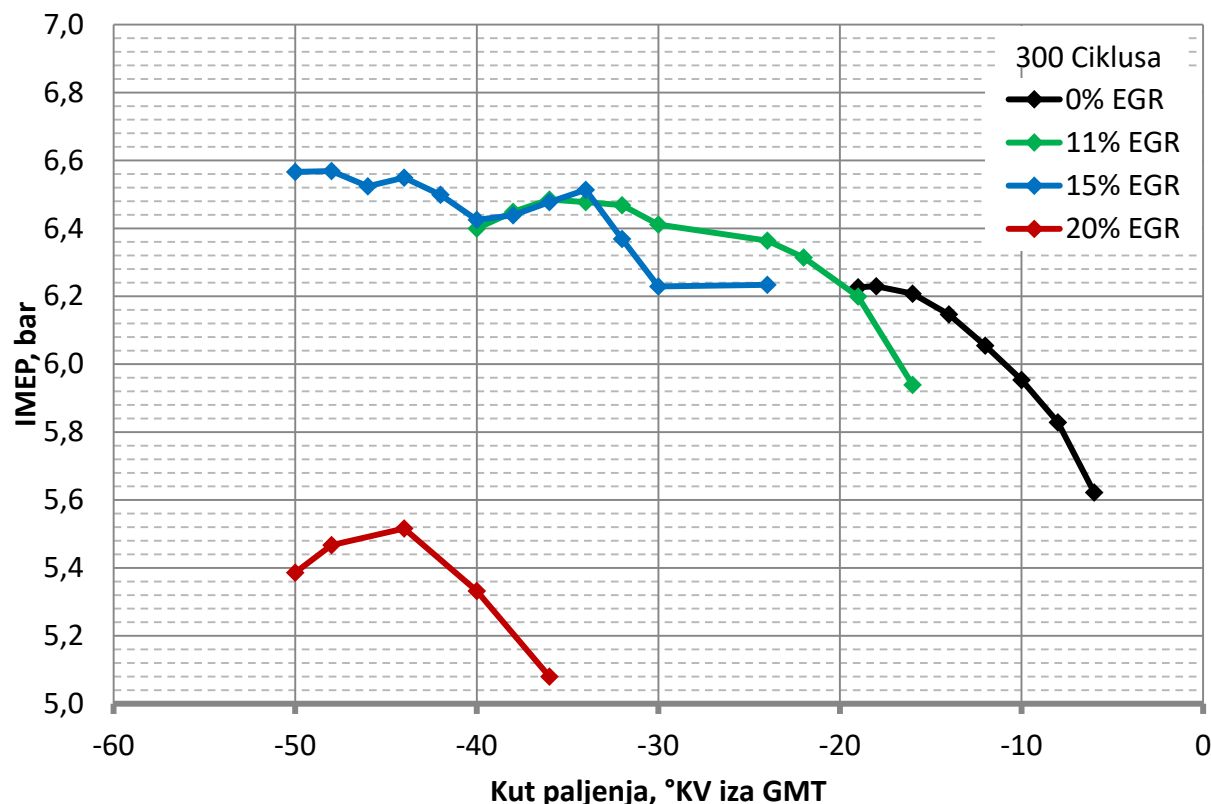
3.5.2 Tlak u usisu, maseni protoci zraka i goriva

Sve četiri serije mjerenja provedene su pri istim masenim protocima zraka i goriva. Kako bi se to omogućilo, prilikom uvođenja EGR-a u usis potrebno je povećati tlak u usisu kako bi se kompenzirali maseni protoci zraka i goriva s povećanjem udjela EGR-a. Tablicom 5 pokazano je povećanje tlaka u usisu za sve četiri serije mjerenja s povećanjem udjela EGR-a.

Tablica 5 Promjena tlaka u usisu s povećanjem udjela EGR-a

EGR	0 %	11 %	15 %	20 %
Tlak u usisu, p_{usis}	0,66 bar	0,73 bar	0,78 bar	0,84 bar

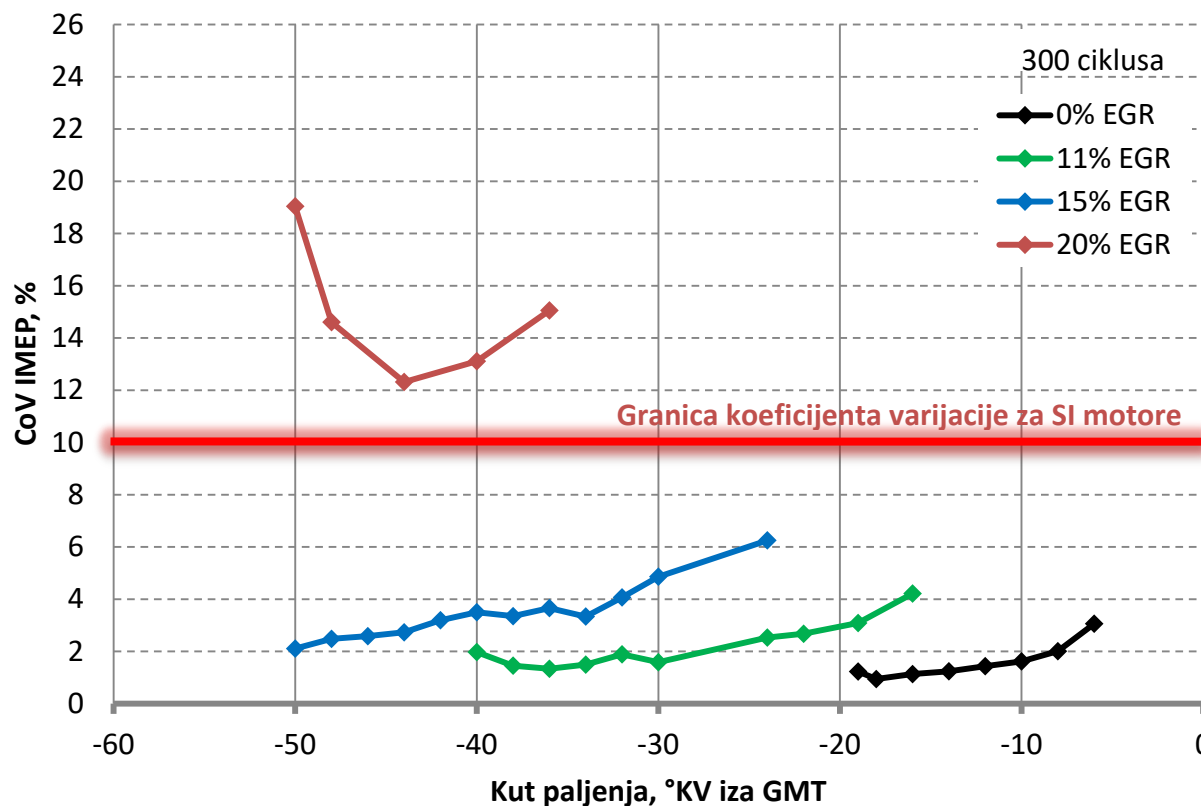
4. Rezultati mjerenja i diskusija



Slika 16 Ovisnost srednjeg indiciranog tlaka o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.

Na slici 16 prikazan je srednji indicirani tlak u ovisnosti o kutu paljenja za različite udjele EGR-a. Porastom udjela EGR-a raste i srednji indicirani tlak za slučajeve od 11% i 15% EGR-a u odnosu na referentni slučaj bez uvođenja EGR-a. Za slučaj sa 20% EGR-a srednji indicirani tlak raste s ranijim kutom paljenja, ali je mnogo manji od srednjeg indiciranog tlaka kod referentnog slučaja bez EGR-a. Razlog tome je što se kod 20% EGR-a uočilo izrazito nestabilno izgaranje te ono ne zadovoljava granicu koeficijenta varijacije srednjeg indiciranog tlaka kod SI motora, dok ostali slučajevi zadovoljavaju, što se može vidjeti na slici 17. Kod konstantnog udjela EGR-a koeficijent varijacije će padati uz raniji kut paljenja i porast srednjeg indiciranog tlaka. Također na slikama 16 i 17 možemo vidjeti da se pri većim udjelima EGR-a kut paljenja pomiče prema nazad. Razlog tome je što se dodavanjem EGR-a u usis smanjuje brzina širenja plamena. Budući da je najranija točka paljenja ograničena pojavom detonantnog izgaranja, može se zaključiti da se dodavanjem EGR-a ta točka pomiče sve više prema nazad i time omogućava odabir optimalnog

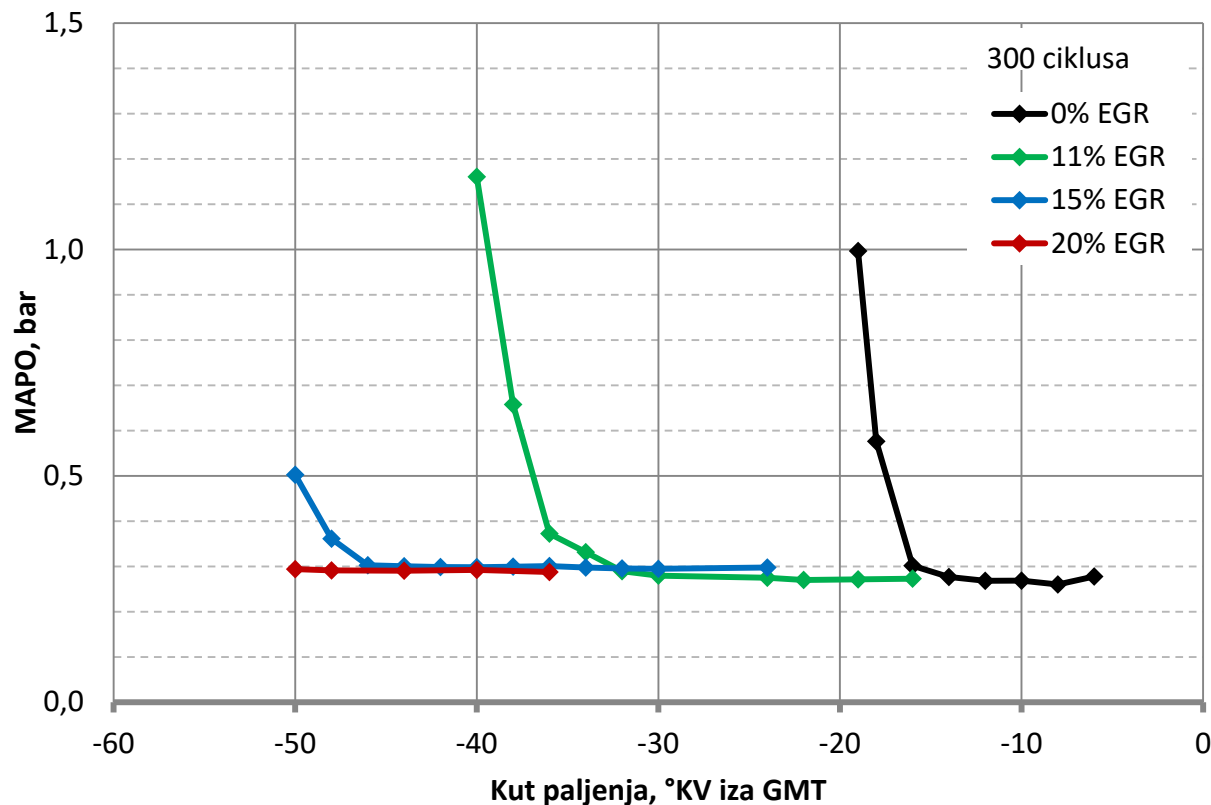
kuta paljenja za određeni udio EGR-a za dobivanje manje specifične indicirane potrošnje goriva te emisije štetnih dušikovih oksida.



Slika 17 Ovisnost koeficijenta varijacije srednjeg indiciranog tlaka o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.

Na slici 18 prikazane su najveće amplitude oscilacija tlaka u ovisnosti o kutu paljenja za različite udjele EGR-a. Na slici je vidljivo da su najveće amplitude oscilacija tlaka približno konstantnih iznosa do određene granice kada MAPO počinje naglo rasti. Ta granica predstavlja dopuštenu najveću amplitudu tlaka oscilacija i iznosi MAPO=0.3 bar.

Ranijim paljenjem kod istog udjela EGR-a ulazi se u područje detonantnog izgaranja. Kod 0% EGR-a i s kutom paljenja od -16°KV iza GMT, motor prelazi u detonantni način izgaranja, dok kod 11% EGR-a dolazi do detonacije tek kod kuta paljenja od -32 °KV iza GMT. Dakle, s pomakom kuta paljenja prema nazad do detonacije će prije doći kod slučaja bez EGR-a, odnosno kod manjih udjela EGR-a. Također, s porastom udjela EGR-a, nestabilnost izgaranja raste. Kod 20% EGR-a do detonacije nije došlo zbog toga što je u cilindru bila premala količina energije za izgaranje po masi gorive smjese. Takvo izgaranje je nestabilno te je pri ispitivanju težilo izostajanju procesa izgaranja zbog preniskih temperatura i tlakova.

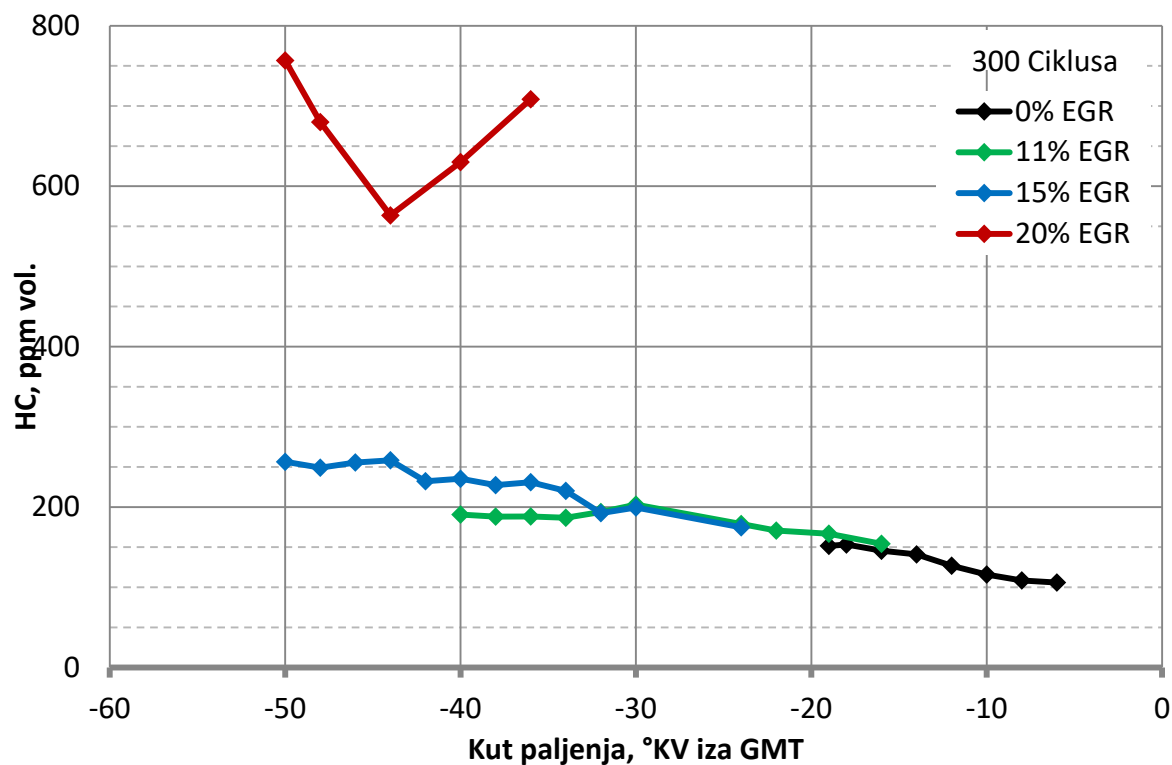


Slika 18 Ovisnost najveće amplitude oscilacija tlaka o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.

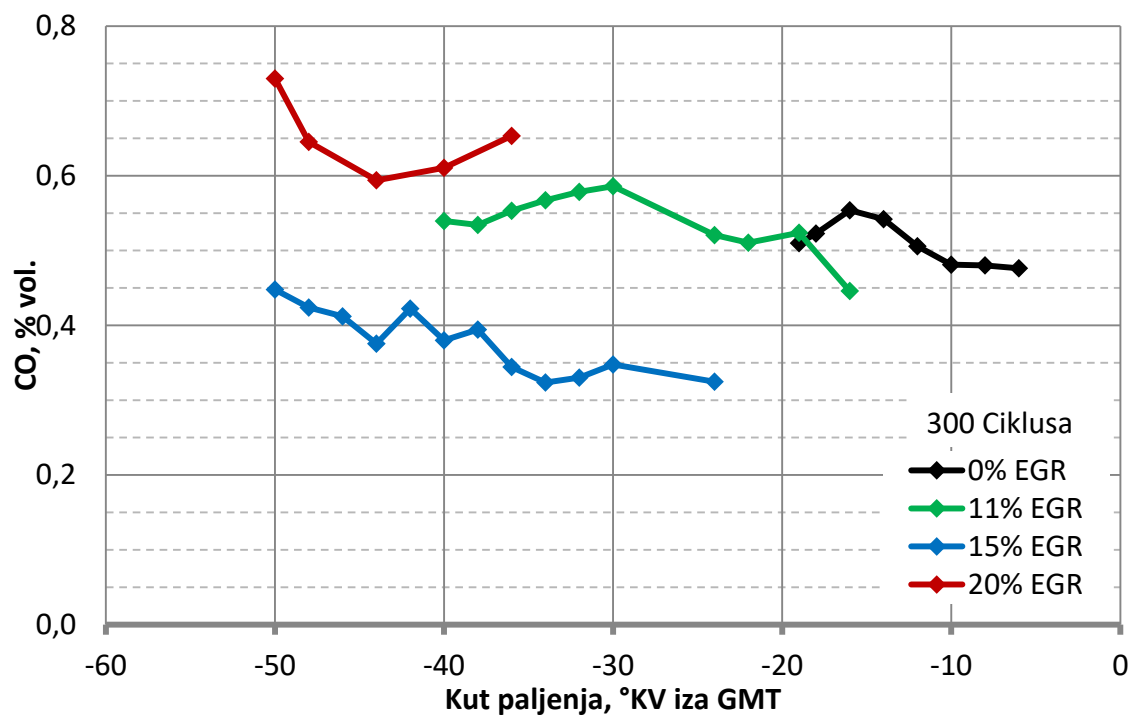
Na slici 19 prikazana je količina neizgorjelih ugljikovodika u ovisnosti o kutu paljenja. Može se zaključiti da porastom udjela EGR-a raste i količina neizgorjelih ugljikovodika. Također, ranijim paljenjem smjese kod konstantnog udjela EGR-a dolazi do povećanja količine neizgorjelih ugljikovodika.

Na slici 20 prikazan je volumni udio ugljikovog monoksida u ovisnosti o kutu paljenja za različite udjele EGR-a. Porastom udjela EGR-a raste volumni udio ugljikovog monoksida. Razlog tome je što uvođenjem produkta izgaranja i miješanjem sa svježim zrakom u usisu proces izgaranja postaje nepotpuniji.

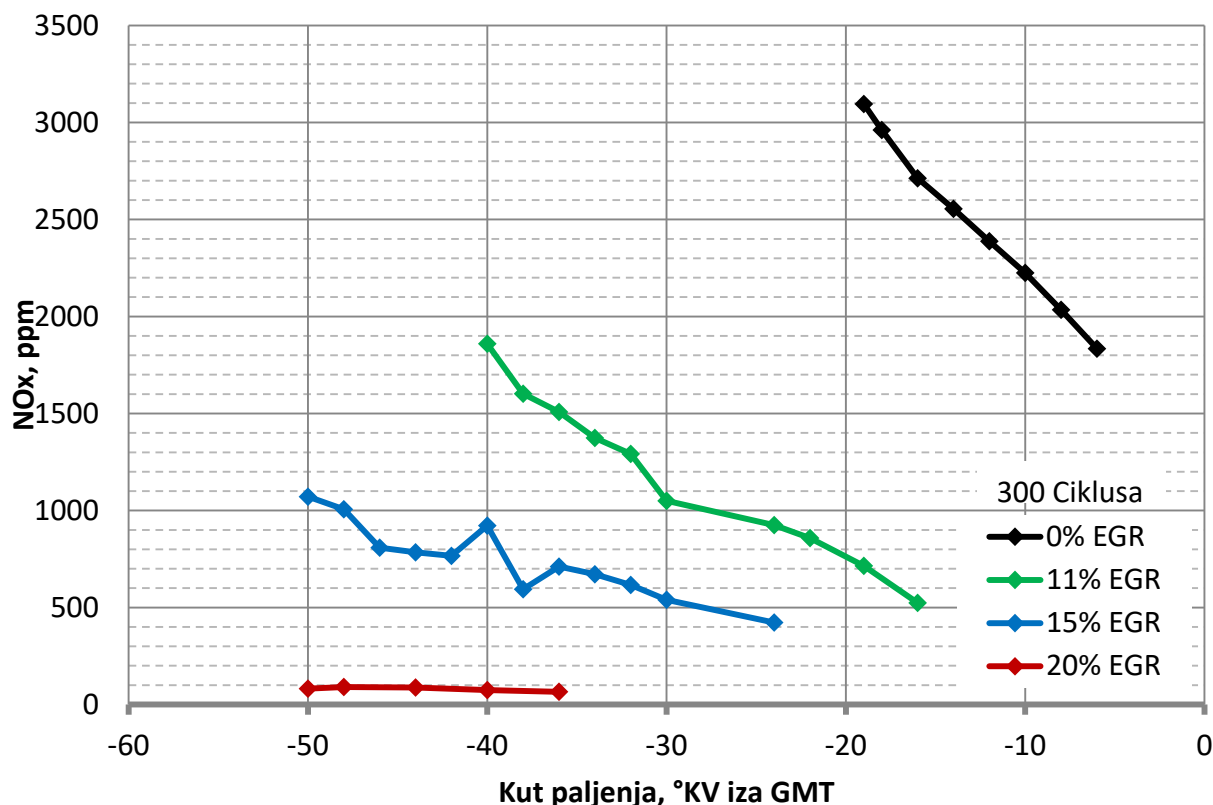
Izrazito je zanimljiv slučaj kod 20% EGR-a, gdje su količine neizgorjelih ugljikovodika i ugljikovog monoksida višestruko veće od ostalih slučajeva. Objašnjenje je vrlo logično. Budući da je kod 20% EGR-a količina kisika premala za normalno izgaranje, velik dio gorive smjese nije uspio sagorjeti, odnosno sa porastom EGR-a raste i stupanj nepotpunosti procesa izgaranja u cilindru.



Slika 19 Ovisnost neizgorjelih ugljikovodika o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.

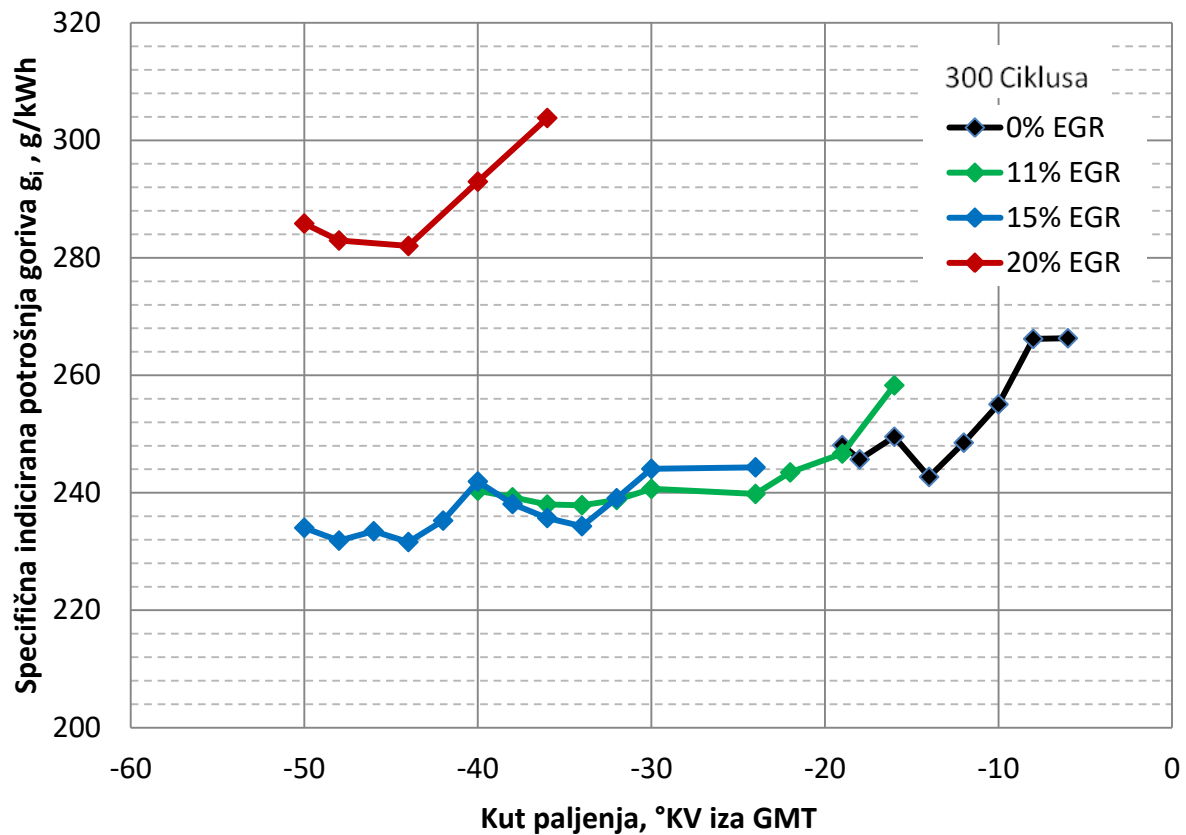


Slika 20 Ovisnost volumnog udjela ugljikovog monoksida o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.



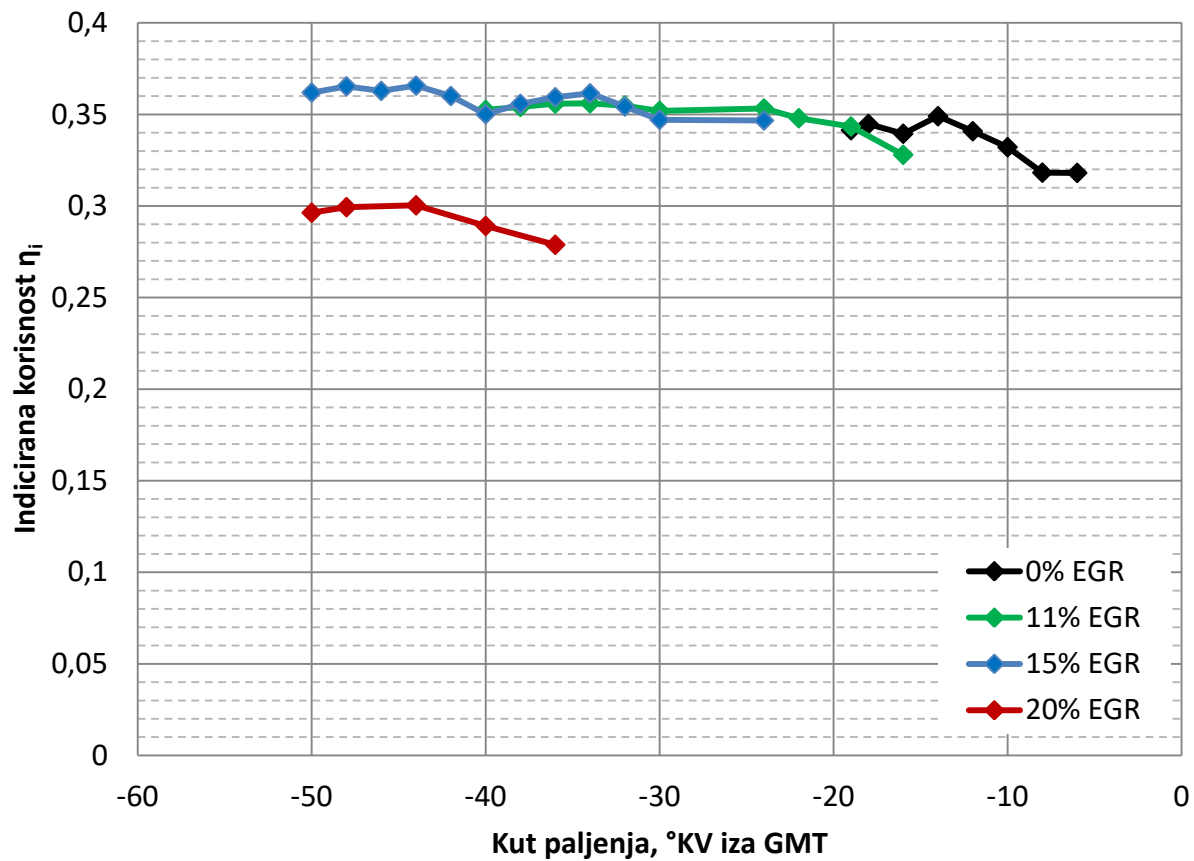
Slika 21 Ovisnost količine dušikovih oksida o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.

Na slici 21 prikazana je količina dušikovih oksida u ovisnosti o kutu paljenja za različite udjele EGR-a. Količina dušikovih oksida izuzetno se smanjuje s povećanjem udjela EGR-a. Upravo ovdje se može uočiti toplinski utjecaj primjene EGR-a. Uvođenjem EGR-a povećava se toplinski kapacitet gorive smjese i kao rezultat smanjenje temperature izgaranja u cilindru. Budući da se formacija dušikovih oksida odvija pri visokim temperaturama, a prilikom primjene EGR-a temperature izgaranja u cilindru su niže, dolazi do nižih emisija dušikovih oksida. S druge strane, pri ranijem paljenju gorive smjese težište procesa izgaranja, odnosno 50% izgaranja, se sve više približava prema GMT što ima za posljedicu povećanje vršnih temperatura izgaranja u cilindru koje uzrokuje povećanu emisiju NO_x spojeva. Dakle, iz dijagrama se može zaključiti da pri ranijem paljenju gorive smjese zbog povećanih temperatura izgaranja u cilindru dolazi do povećanja količine dušikovih oksida u ispušnim plinovima.



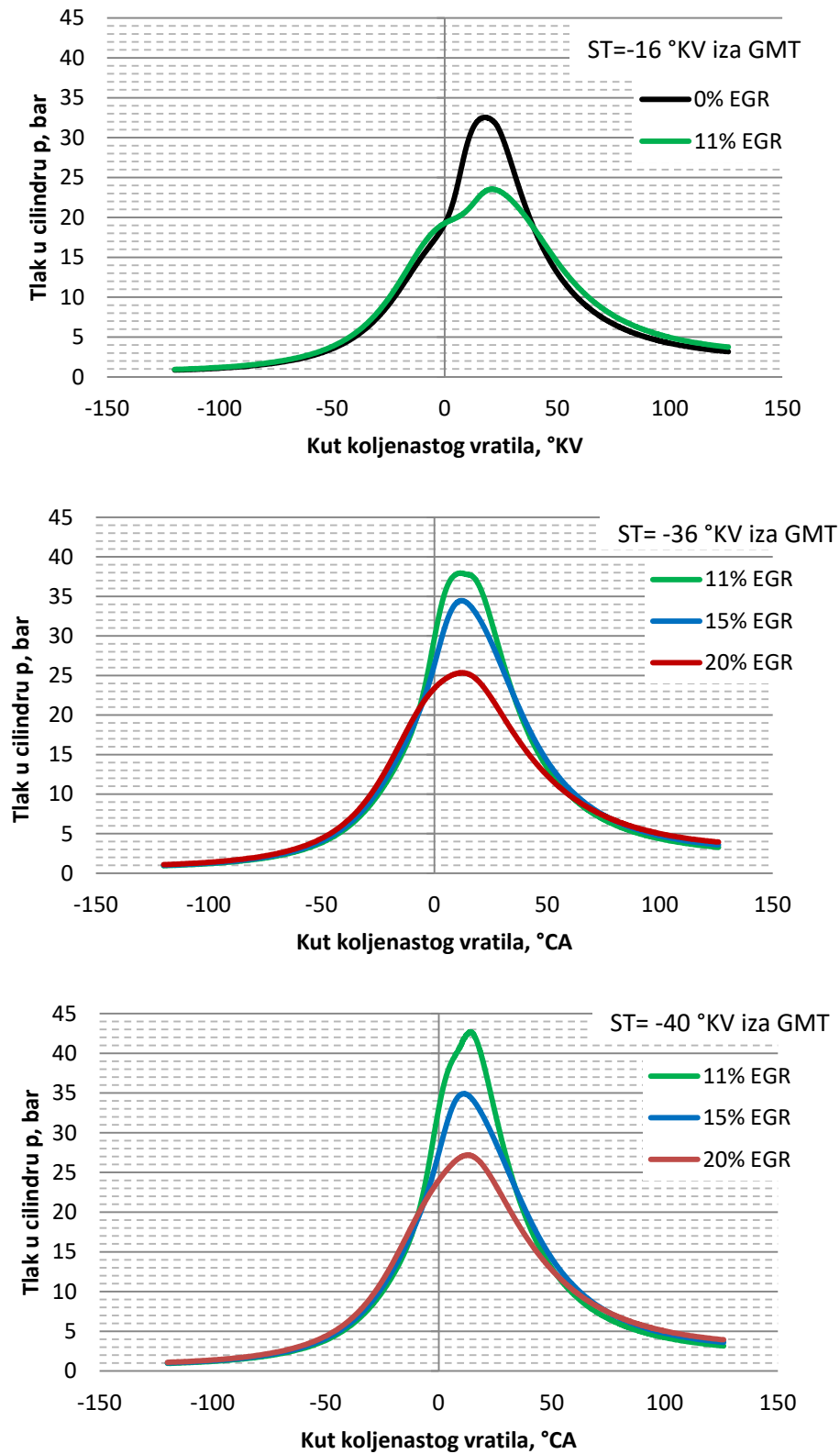
Slika 22 Ovisnost specifične indicirane potrošnje goriva o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.

Na slici 22 prikazana je specifična indicirana potrošnja goriva u ovisnosti o kutu paljenja za različite udjele EGR-a. Iz dijagrama se može vidjeti da porastom udjela EGR-a pada specifična indicirana potrošnja goriva. Međutim, kod slučaja s 20% EGR-a specifična indicirana potrošnja goriva je porasla. Također ranijim paljenjem pri konstantnom udjelu EGR-a pada specifična indicirana potrošnja goriva.

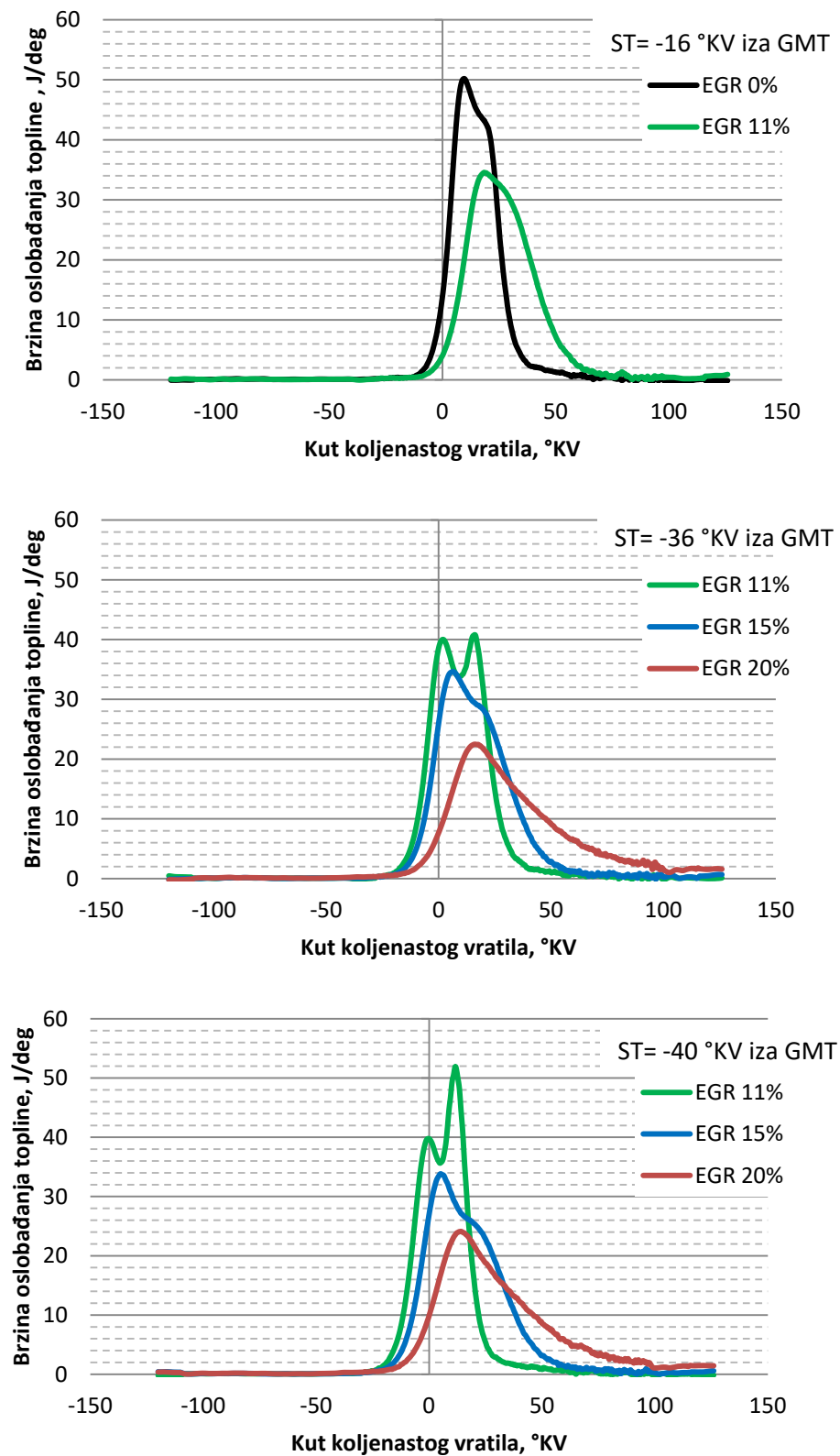


Slika 23 Ovisnost indicirane korisnosti o kutu paljenja za različite udjele EGR-a.

Na slici 23 prikazana je indicirana korisnost u ovisnosti o kutu paljenja za različite udjele EGR-a. Iz dijagrama se može zaključiti da inducirana korisnost raste kada je u usisnoj smjesi veći udio EGR-a. Također se može uočiti da indicirana korisnost raste s ranijim paljenjem gorive smjese.



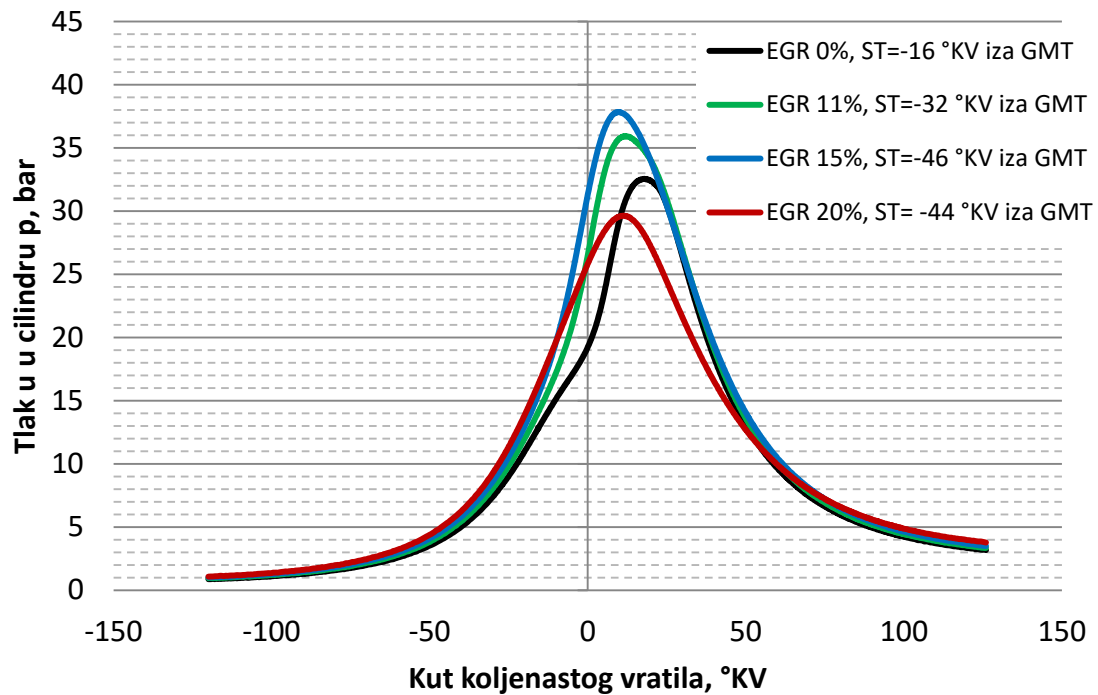
Slika 24 Ovisnost tlaka u cilindru o kutu koljenastog vratila za isti kut paljenja i različite udjele EGR-a.



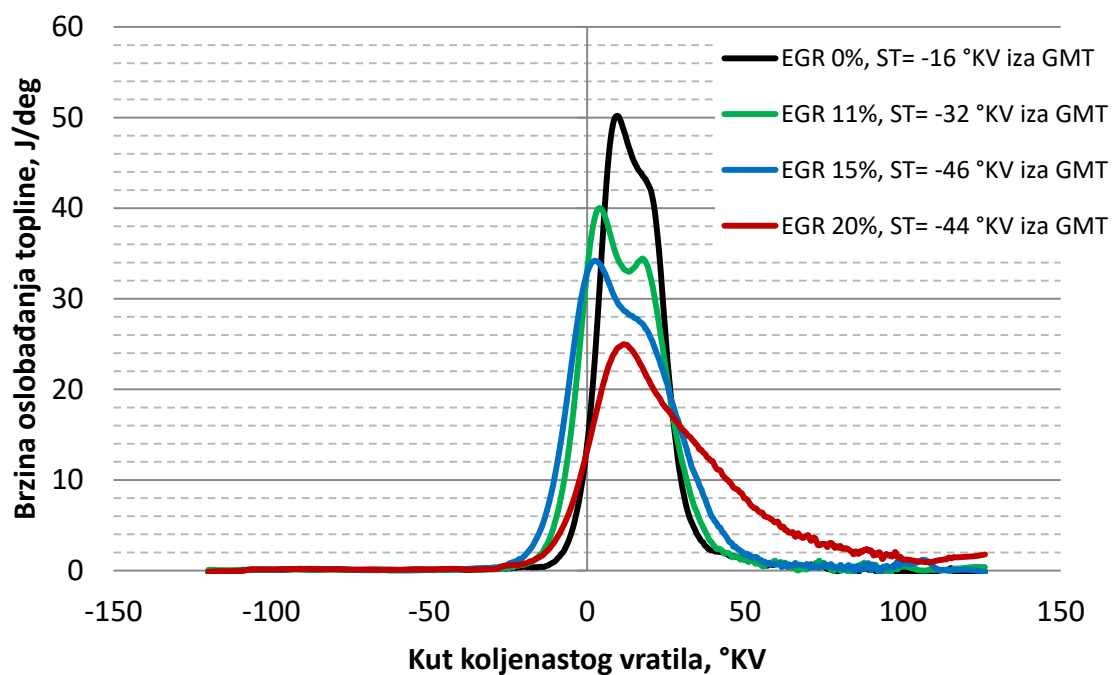
Slika 25 Ovisnost brzine oslobađanja topline (ROHR) o kutu koljenastog vratila za isti kut paljenja i različite udjele EGR-a.

Na slikama 24 i 25 prikazani su tlakovi u cilindru i brzina oslobađanja topline u ovisnosti o kutu koljenastog vratila za isti kut paljenja. Prikazane su tri usporedbe uz isti kut paljenja za različite udjele EGR-a. Prvi dijagram prikazuje usporedbu 2 slučaja, odnosno slučajeve sa 0% EGR-a i 11% EGR-a za isti kut paljenja -16 °KV iza GMT. Nadalje, drugi i treći dijagram pokazuju usporedbu 3 slučaja, i to sa 11 % EGR-a, 15 % EGR-a te 20 % EGR-a za isti kut paljenja -36 °KV iza GMT, odnosno -40 °KV iza GMT. Iz svih dijagrama se može vidjeti da su porastom udjela EGR-a vršne vrijednosti tlaka u cilindru smanjene. Najmanji pad tlaka u cilindru za isti kut paljenja dobiva se bez primjene EGR-a, odnosno 0% EGR-a, dok se najveći pad tlaka u cilindru postiže se kod najvećeg udjela EGR-a, odnosno 20% EGR-a. Budući da vršni tlak u cilindru ovisi o kutu paljenja, iz dijagrama se vidi da se najveći vršni tlak za konstantan udio EGR-a pojavljuje kod ranijeg paljenja. Primjerice, pri 11% EGR-a, vršni tlak je najveći pri kutu paljenja -40 °KV iza GMT. Može se uočiti da se dodavanjem EGR-a u usis pri istom kutu paljenja mogu smanjiti visoki tlakovi u cilindru, odnosno naprezanja u cilindru. Također, može se zaključiti da se dodavanjem EGR-a u usis točka paljenja pomiče sve više prema nazad. To nam omogućuje odabir ranijeg paljenja gorive smjese u cilju dobivanja manje specifične potrošnje goriva i manjih emisija štetnih ispušnih plinova.

Što se tiče brzine oslobađanja topline kod izgaranja, porastom udjela EGR-a za isti kut paljenja, njezina vrijednost pada. Površina ispod krivulje predstavlja ukupnu količinu oslobođene topline. Uvođenjem EGR-a u usis, u cilindru je sada potrebno dulje vrijeme za sudaranje molekula goriva i kisika, odnosno do njihove kemijske reakcije zbog prisutnosti produkta izgaranja. Produkti izgaranja u cilindru ponašaju se kao inertni plinovi i ne sudjeluju u procesu izgaranja. Kao posljedica sporijeg sudaranja reaktantnih molekula (gorivo i kisik) brzina oslobođena toplina je manja s porastom udjela EGR-a.



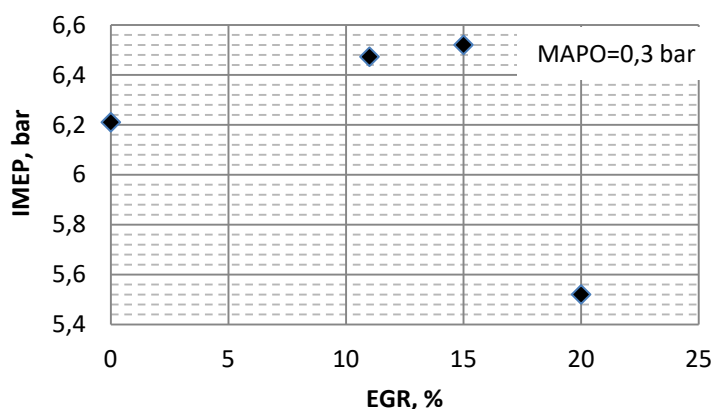
Slika 26 Ovisnost tlaka u cilindru o kutu koljenastog vratila za optimalni kut paljenja.



Slika 27 Ovisnost brzine oslobađanja topline (ROHR) o kutu koljenastog vratila za optimalni kut paljenja.

Na slikama 26 i 27 prikazani su tlakovi u cilindru i brzina oslobađanja topline u ovisnosti o kutu koljenastog vratila za optimalni kut paljenja za različite udjele EGR-a. Optimalni kut paljenja je najraniji kut paljenja kod određenog udjela EGR-a prije pojave detonacije. Odnosno, optimalni kut paljenja odgovara zadnjoj točki paljenja gorive smjese kod određenog udjela EGR-a prije naglog rasta krivulje najveće amplitude oscilacije tlaka prema slici 11. Tako je za slučaj bez uvođenja EGR-a optimalni kut paljenja jednak 6.-toj točki mjerenja, odnosno kutu paljenja od -16° KV iza GMT. Na jednak način određuju se i ostali optimalni kutovi paljenja za 11% , 15% i 20% EGR-a. Iz dijagrama se može vidjeti da tlak u cilindru raste s povećanjem udjela EGR-a. S druge strane, brzina oslobađanja topline pada s povećanjem udjela EGR-a.

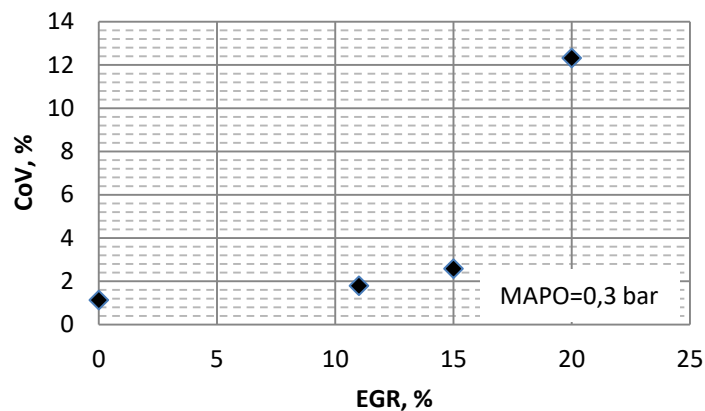
Prema slici 16 izračunavaju su kutovi paljenja gorive smjese pri različitim udjelima EGR-a za najveću amplitudu oscilacije tlaka koja iznosi 0.3 bar. Ta vrijednost granična je vrijednost stabilnog rada motora, odnosno rada motora bez pojave detonacije. Potom se preko izračunatog kuta paljenja izračunaju sve ostale veličine, također za različite udjele EGR-a , kao što su srednji indicirani tlak, koeficijent varijacije srednjeg indiciranog tlaka, emisija štetnih ispušnih plinova, specifična indicirana potrošnja goriva, indicirana iskoristivost te temperatura u ispuhu. Sljedećim dijagramima prikazane su prethodno navedene veličine u ovisnosti o udjelu EGR-a.



Slika 28 Ovisnost srednjeg indiciranog tlaka o udjelu EGR-a.

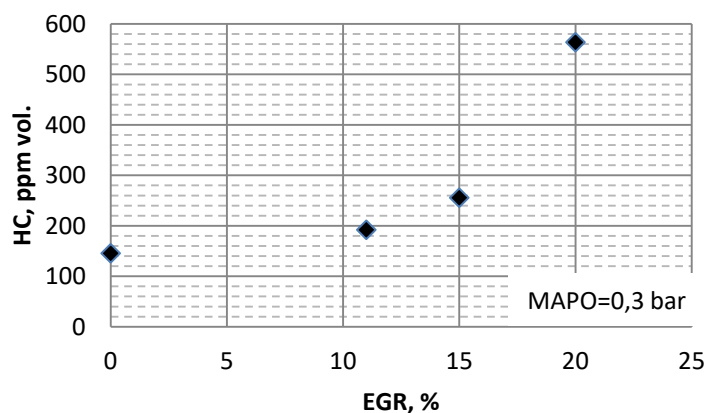
Na slici 28 prikazan je srednji indicirani tlak za različite udjele EGR-a. Porastom EGR-a raste srednji indicirani tlak. Velik utjecaj na srednji indicirani tlak i cikličke varijacije tlaka ima brzina

širenja plamena u cilindru. Povećanjem EGR-a, brzina rasprostiranja plamena opada, a povećavaju se srednji indicirani tlak i cikličke varijacije.



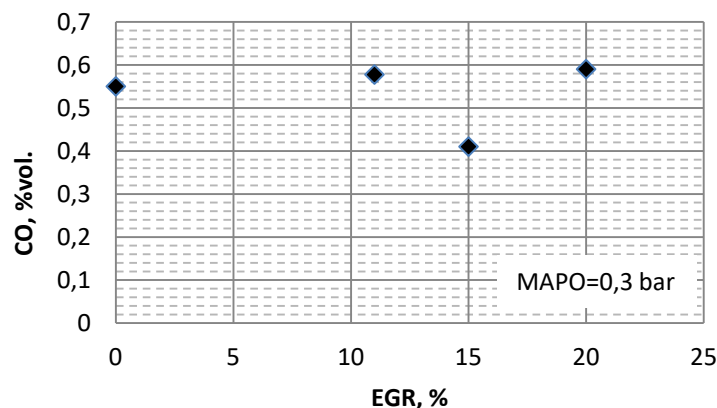
Slika 29 Ovisnost koeficijenta varijacije srednjeg indiciranog tlaka o udjelu EGR-a.

Na slici 29 prikazan je koeficijent varijacije srednjeg indiciranog tlaka za različite udjele EGR-a. Za 0%, 11% i 15% EGR-a koeficijent varijacije srednjeg indiciranog tlaka je manji od 10%, što znači da je postignut stabilan rad motora. S druge strane, koeficijent varijacije srednje indiciranog tlaka za 20% EGR-a je veći od 10%, te rad motora nije stabilan, te javljaju se velike cikličke varijacije tlaka u cilindru.



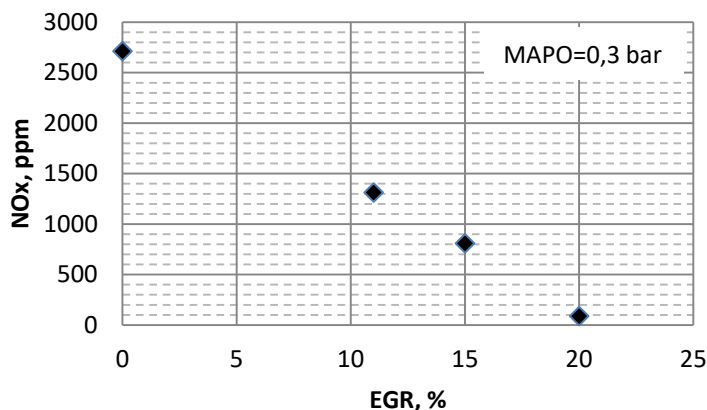
Slika 30 Ovisnost neizgorjelih ugljikovodika o udjelu EGR-a.

Na slici 30 prikazana je količina neizgorjelih ugljikovodika u ispušnim plinovima za različite udjele EGR-a. Količina neizgorjelih ugljikovodika lagano raste s povećanjem udjela EGR-a, dok kod 20% EGR-a postiže izrazito visoku vrijednost.



Slika 31 Ovisnost volumnog udjela ugljikovog monoksida o udjelu EGR-a.

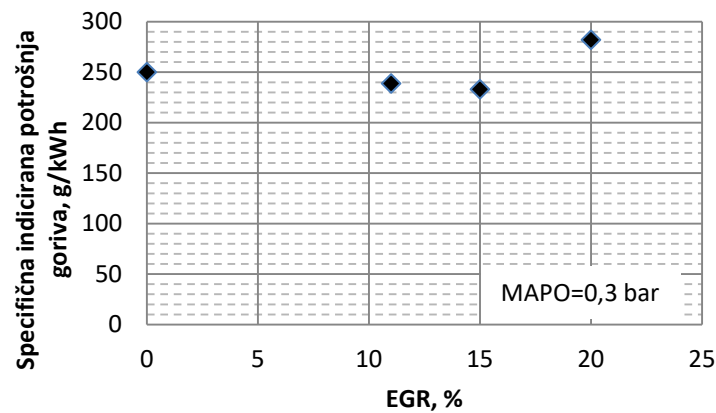
Na slici 31 prikazan je volumni udio ugljikovog monoksida u ispušnim plinovima za različite udjele EGR-a. Volumni udio ugljikovog monoksida povećava se s povećanjem udjela EGR-a, izuzev 15% EGR-a.



Slika 32 Ovisnost količine dušikovih oksida o udjelu EGR-a.

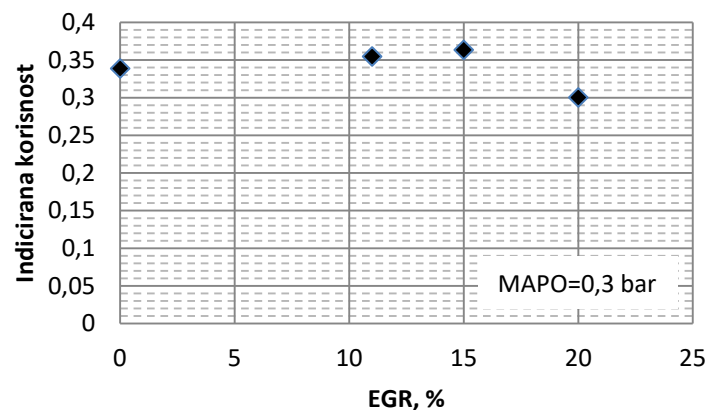
Na slici 32 prikazana je količina dušikovih oksida u ispušnim plinova za različite udjele EGR-a. Povećanjem udjela EGR-a, emisija dušikovih oksida opada. Već kod 11% EGR-a postiže se

dvostruko manja emisija dušikovih oksida. Kod 20% EGR-a emisija dušikovih oksida je jako niska zbog vrlo niskih temperatura izgaranja u cilindru.



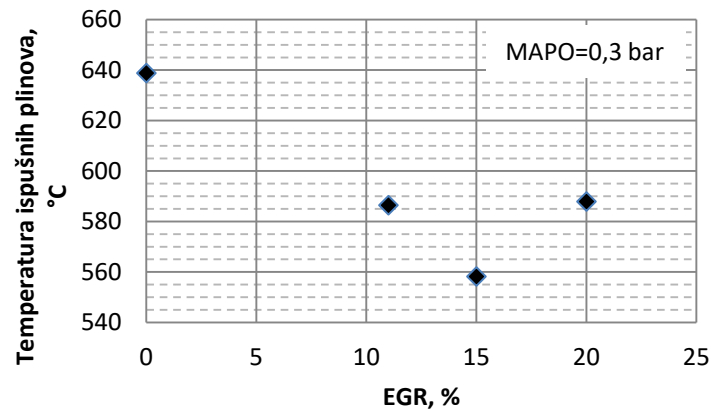
Slika 33 Ovisnost specifične indicirane potrošnje goriva o udjelu EGR-a.

Na slici 33 prikazana je specifična indicirana potrošnja goriva u ovisnosti o udjelu EGR-a. Porastom udjela EGR-a smanjuje se specifična indicirana potrošnja goriva.



Slika 34 Ovisnost indicirane korisnosti o udjelu EGR-a.

Na slici 34 prikazana je indicirana korisnost u ovisnosti o udjelu EGR-a. Indicirana korisnost i specifična indicirana potrošnja goriva obrnuto su proporcionalne te se s porastom udjela EGR-a indicirana korisnost poboljšava.



Slika 35 Ovisnost temperature ispušnih plinova u ispuhu o udjelu EGR-a.

Na slici 35 prikazane su temperature ispušnih plinova mjerene u ispuhu za različite udjele EGR-a. Uvođenjem EGR-a dolazi do smanjenja temperatura ispušnih plinova koje su posljedica smanjenih temperatura izgaranja u cilindru. Smanjenje temperature ispušnih plinova izrazito je povoljna pojava jer se smanjuju toplinski gubitci, kao i toplinska opterećenja ispušnih ventila, trokomponentnog katalizatora, kao i turbina koje su pogonjene ispušnim plinovima.

5. Zaključak

Ispitivanje utjecaja EGR-a na proces izgaranja i rad Ottovog motora provedeno je na jednocilindarskom četverotaktnom Ottovom motoru pri konstantnoj brzini vrtnje motora i sa stehiometrijskom gorivom smjesom.

Analizom rezultata ispitivanja zaključeno je da se povećanjem udjela EGR-a smanjuje emisija dušikovih oksida, ali istovremeno raste emisija neizgorjelih ugljikovodika i ugljikovog monoksida koji nastaju zbog sve izraženijeg nepotpunog procesa izgaranja. No, budući da motor radi sa stehiometrijskom gorivom smjesom moguće je primjenjivati trokomponentni katalizator koji će smanjivati emisije navedenih štetnih ispušnih plinova. Također, povećanjem udjela EGR-a smanjuju se temperature ispušnih plinova u ispuhu kao posljedica smanjenih temperatura izgaranja u cilindru. Smanjenje temperatura ispušnih plinova izrazito povoljno utječe na dijelove smještene u ispuhu koji su stoga manje toplinski opterećeni (ispušni ventili, trokomponentni katalizator, turbina). Pri izgaranju sa stehiometrijskom gorivom smjesom pomiješanom s hlađenim produktima izgaranja dokazano je da se detonacija javlja pri višim srednjim indiciranim tlakovima (IMEP) u odnosu na izgaranje bez EGR-a. Međutim, prekomjerne količine povratnih ispušnih plinova, u ovom slučaju pri 20% EGR-a, uzrokovat će nestabilno izgaranje i velike cikličke varijacije tlaka u cilindru. To uzrokuje nezadovoljavanje granične vrijednosti koeficijenta varijacije srednjeg indiciranog tlaka i povećanje emisije neizgorjelih ugljikovodika i ugljikovog monoksida. Ostali slučajevi, kao što su slučajevi s udjelom EGR-a manjim od 20%, zadovoljavaju stabilnost rada motora, odnosno koeficijent varijacije u svim točkama mjerenja je manji od 10%. Kao rezultat, javlja se mogućnost optimiranja kuta paljenja gorive smjese, koji ovisi o udjelu EGR-a, a u svrhu dobivanja manje potrošnje goriva odnosno veće korisnosti motora te manjih emisija dušikovih oksida.

Literatura:

- [1] Haiqiao Wei, Tianyu Zhu, Gequn Shu, *Gasoline engine exhaust gas recirculation-A review*, Appl. Energy 99 (2012) 534-544
- [2] G.H. Abd-Alla, *Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review*, Energy Conversion and Management 43 (2002) 1027-1042
- [3] Zheng, Reader, Hawley, *Diesel engine exhaust gas recirculation- a review*, Energy Conversion and Management 45 (2004) 883-900
- [4] Pan, Shu, Wei, Zhu, Liang, Liu, *Effects of EGR, compression ratio and boost pressure on cyclic variation of PFI gasoline engine at WOT opration*, Appl. Energy 64 (2014) 491-498
- [5] Fontana, Galloni, *Experimental analysis of a spark-ignition engine using exhaust gas recycle at WOT operation*, Appl. Energy 87 (2010) 2187-2193
- [6] Li, Liu, Wang, Xu, *Experimental investigation of the thermal and diluents effects of EGR components on combustion and NO_x emissions of a turbocharged natural gas SI engine*, Appl. Energy 88 (2014) 1041-1050
- [7] Kaiser, Krueger, Harris, Cruff, *“Doing More with Less” - The Fuel Economy Benefits of Cooled EGR on a Direct Injected Spark Ignited Boosted Engine*, SAE papers, 2010, 2010-01-0589
- [8] Galloni, Fontana, Palmaccio, *Numerical analyses of EGR techniques in a turbocharged spark-ignition engine*, Appl. Energy, 39 (2012) 95-104
- [9] Brecq, Bellettre, Tazerout, *A new indicator for knock detection in gas SI engines*, Internation Journal of Thermal Science, 42 (2003) 523-532
- [10] Lavoie, Heywood, Keck, *Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines*, Massachusetts Institute of Technology, 2007
- [11] Mahalec, Lulić, Kozarac: *Motori s unutaršnjim izgaranjem*, Fsb, Zagreb, 2012
- [12] <http://www.continentalengines.com/hatz-diesel-1d90-1d81-engines.html>